WHAT IS SCIENTIFIC THINKING?

A Discussion Paper
by Hugh Munby

March 1982

Discussion Papers are working documents made available by the Science Council of Canada, in limited number, to interested groups and individuals for the benefit of their comments.

The views expressed in this Discussion Paper are those of the author and are not necessarily endorsed by the Science Council of Canada.

Copies of

WHAT IS SCIENTIFIC THINKING?

are available
free of charge from:

The Publications Office
Science Council of Canada
100 Metcalfe Street
Ottawa, Ontario.
K1P 5M1

Des exemplaires de
Qu'est-ce que la pensée scientifique? seront bientôt disponibles gratuitement.

©Minister of Supply and Services, 1982

Catalogue No. SS21-4/6-1982E
ISBN 0-662-12004-3

TABLE OF CONTENTS

Foreword		5
I.	INTRODUCTION	7
II.	THE KNOWLEDGE EXPLOSION, A PROBLEM FOR TEACHERS AND STUDENTS ALIKE	10
III.	TAKING A LOOK AT THINKING	12
	Dead Philosophers and Other Puzzles	12
	Tests of Thinking in General	14
	Standard Interpretations of Thinking in Science	16
	A Radically Different Approach to Thinking of Scientific Thinking	18
IV.	SOMETHING ON THE NATURE OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE	22
	Are There Really Black Holes? or, "How could you ever tell anybody if you happened into one?"	23
V.	THE CONTEXT OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE: EDUCATION OR INDOCTRINATION?	26
	The Importance of Making Context Clear	27
	"Heating Mercuric Oxide"	27
VI.	HOLDING SCIENTIFIC KNOWLEDGE	30
	Another Look at "Heating Mercuric Odixe"	32
	Intellectual Independence	35
VII.	ENDINGS AND BEGINNINGS	37
	What is the Present State of Affairs?	38
	What Changes Can be Made?	40
Appendix:	An Annotated List of Sources	42

FOREWORD

This paper is the fourth in a series of discussion papers prepared for a study of Canadian science education being undertaken by the Science Council of Canada, under the direction of its Science and Education Committee. The study, which began in the spring of 1980, has three overall aims:

- to establish a documented basis for describing the present purposes and general characteristics of science teaching in Canadian schools;
- to conduct an historical analysis of science education in Canada;
- to stimulate active deliberation concerning future options for science education.

As this third aim suggests, the Science Council has, at present, no collective view on desirable directions for science education in Canada. However, in order to develop such a view, it is actively soliciting a diversity of opinions. It is intended that these viewpoints, expressed in the form of discussion papers and disseminated as widely as possible, will prompt science educators and others to review current policies and practices. By sharing in these deliberations and at the same time conducting a systematic inquiry into current and past policies and practices, the Science Council hopes to acquire a good understanding of the state and needs of science education in this country, and thereby make constructive recommendations.

Earlier papers in this series have stressed the importance of certain objectives for science education which, it has been claimed, are absent from programs in Canadian schools. James Page, in A Canadian Context for Science Education, focused on the potential of science courses to contribute to improved national awareness. Glen Aikenhead, by contrast, thought science should be taught in such a way that students learn about its relevance and limitations in regard to social and political problems. The third paper, An Engineer's View of Science Education, by Donald George, suggests that the intellectual processes of the engineer should be considered at least as important as those of the scientist when the objectives of science teaching are being formulated.

This paper takes a somewhat different approach; it re-examines an objective long considered by science teachers to be important. Hugh Munby, an experienced teacher and teacher educator, takes a fresh look at what it means to try to get students to think critically and scientifically. Illustrating his argument liberally with transcribed excerpts from actual instances of teaching, he argues a case for what he calls "intellectual independence" as an important aim for all science teaching.

It must be stressed that the views expressed in this discussion paper are those of the author, and not necessarily those of the Science Council or its Science and Education Committee. However, in publishing the paper, Council believes that a well-argued position has been set out, and that discussion amongst a wider audience can benefit both the study and Canadian science education, in general.

James M. Gilmour,
Director of Research,
Science Council of Canada

INTRODUCTION

Although I am an avid collector of lesson tapes and transcripts, I have no such precise records of my own performance as a high school science teacher. Yet, I vividly remember one piece of my teaching. There I was, a newly arrived immigrant to Canada, a novice teacher in every sense, about to begin one of my first chemistry classes. Oh, I was a science teacher, all right; I sported a freshly laundered lab coat and stood resolutely behind the teacher's laboratory bench. I possessed the signs of authority and the security these offer their owner but, more than that, as an officially certified science teacher I believed I really knew what was what in the material world. Almost as if this pomposity was not enough, I announced dramatically, and in my thickest British accent, "Even if you learn nothing else in this class, at least you will learn how to think," (or something like that). I then launched into orbitals and atomic structure, leaving everyone else in the room far behind. Perhaps what is most irksome about this distressingly permanent memory is that I came soon afterwards to realize that I hadn't the faintest idea of what I meant by "learning to think" or by "thinking."

Thinking - and I know I shouldn't say this - thinking ought to be on every educator's mind. Indeed, if we all scrupulously followed the slogan-like aims of education promulgated by every school board in the country, we would be up to our necks trying to get our students to "think." Punning aside, we recognize the gravity of the challenge to

get our students to think, to think critically, and even to think scientifically. Certainly it is abundantly clear to me that science education fails if it doesn't tackle the matter of thinking.

However, if we don't get a firm grip on what we mean by "thinking critically" or "thinking scientifically," these phrases will become vacuous slogans quite beyond translation into teaching methods and curriculum materials. In my view, we have enough educational slogans and, because I judge "scientific thinking" and "critical thinking" too important to be cast around offhandedly, I will argue how a very fundamental and specific aspect of these terms can and must be embraced in the discourse of science teaching itself.

I shall begin by showing how urgent is the task of getting clear about scientific thinking. Simply, knowledge in science is growing in a way that makes it imperative for everyone to know how to handle knowledge itself. I will then turn to a general theme of this paper: there is much more to scientific thinking (or critical thinking in science) than puzzle-solving and logic-wielding. Here, I will purposefully avoid a detailed philosophical and psychological treatise on the nature of thinking and, instead, concentrate on some straightforward examples of what seems to pass for thinking. These examples show that our conventional ways of talking about "thinking" in science education are inadequate to the task of showing us what, fundamentally, students have to know at base in order to think scientifically.

Next, we need to consider what scientific knowledge is all about. On this, we can build some ideas about what it means to hold scientific knowledge, the essential points being illustrated with extracts from science teaching. This leads us to see what has to be provided in science teaching so we can be sure that youngsters have at least the chance to think scientifically.

Because I understand that one purpose of a paper like this is to promote discussion, I will end with a number of possible discussion

points from the topics I cover. My hope is that these, together with some practical investigations and suggestions, will not limit discussion, but will lead to spirited interchanges.

II THE KNOWLEDGE EXPLOSION, A PROBLEM FOR TEACHERS AND STUDENTS ALIKE

If the seventies are remembered for anything, they should be remembered for how they confronted us with deep and seemingly intransigent problems: the poisoning of ourselves and our environment, the ethics of genetic engineering, the certain depletion of fossil fuels, the uncertain promise of nuclear energy, and the "knowledge explosion." All are science-related and demand thoughtful solutions by a populace which can make sense of scientific information and judge it. But, for my money, the problem that weighs most heavily on the shoulders of science teachers and curriculum developers at all levels of education is the so-called knowledge explosion.

Personally, I have a distaste for using phrases like "knowledge explosion" without getting some fix on the extent of the problem apparently conveyed by the expression. So, with the expert help of a research librarian at Queen's University, I attempted to gauge the extent of the growth. The findings were sobering. For instance:

- The total number of documents cited in *Chemical Abstracts* grew from 239 687 in 1967 to 306 906 in 1980.
- In 1927, *Biological Abstracts* cited 14 506 documents; the estimate for 1980 was 162 500.
- The subject of "Quantum Mechanics" in *Chemical Abstracts*, which elicited 634 papers in 1967, had burgeoned to an estimated 1180 papers in 1980.
- There are between 8 to 10 million pages of printed matter on science and technology topics added annually to our collected stock, according to a member of the USSR Academy of Sciences.

I really have no idea how science teachers are meant to cope with all this information and keep sufficiently alert to developments in their subject so that they can offer contemporary knowledge to students. It is equally staggering to contemplate the additional amount of information that our high school and university graduates will face during the course of their adult and professional lives. How will they cope? The typical way of addressing this problem is to suggest that we need to get students to think critically about scientific information so that they can deal with it intelligently. I agree wholeheartedly, but I don't agree that our usual ways of construing critical or scientific thinking are going to be helpful. They may be downright misleading.

III TAKING A LOOK AT THINKING

What we mean by "thinking" is ambiguous and obscure. Traditionally, the term "thinking" has been used to embrace a wide variety of mental processes, from the meanderings of the mind while we walk along the street, to the more disciplined mental activities we believe we engage in when we play chess, argue with our colleagues, and teach. Because it is not possible to provide a broadly satisfying definition of "thinking" in this paper, I will provide a few examples of the term's use. From these at least we might uncover a sense of what we think we do when we think.

Dead Philosophers and Other Puzzles

> A ship is twice as old as its boiler was when the ship was as old as the boiler is. The sum of their ages equals 49 years. How old is the ship and how old is the boiler?

Puzzles like this are intriguing. They take a bit of work; yet we can solve them once we have hit upon the right way to use the rules and algorithms. In some puzzles the rules are less than obvious. In cryptic crossword puzzles, for example, there <u>are</u> rules. "A superior helper" in seven letters is "abettor," but what rules are used to solve "unearthed former philosopher at start of day"?

Sticking to rules, then, is a feature of thinking, but sticking to rules overzealously can cause difficulties when puzzles or problems

require "breaking set." For instance: "There is three errers in this sentence." Can you find them? And, in the figure below, move just one match so that the left-hand side of the equation equals the right. (There are two quite different solutions.)

One might object that puzzles like these don't arise in science teaching. But they do. We all know that getting youngsters to balance chemical equations, compute the current through a simple circuit, determine the velocity of a frictionless vehicle on an inclined plane, and so forth, are part and parcel of the business of teaching science. For instance, take the following segment from the beginning of a grade 13 lesson*:

Teacher: $1s^2\ 2s^2\ 2p^5$. And what will that be?

Michael: Fluorine?

Teacher: That would be the fluorine atom, eh? And so the fluorine ion?

(There is a pause followed by a few indistinct mumblings.)

Betty: Six.

Teacher: Six. Neon? Betty, since you are doing so well...

(The lesson continues.)

---

* The names have been changed, but actual transcripts are used in this paper.

Puzzle-solving, if you will, is certainly one aspect of thinking, although the concept of thinking is broader.

Tests of Thinking in General

The scope of what might be meant by "thinking" is evident in the vast quantity of test materials that have been developed with the specific intent of measuring aspects of thinking ability. The following two items appear in the Canadian version of a widely used intelligence test:

> Cause and effect, means and ends, seed and _____ cannot be severed.
>
> (A) caution (B) thought (C) fruit (D) science
> (E) philosophy

> A table model radio set is made to sell for $29.75. The dealer's cost is 60 per cent of the established selling price. What is the dealer's gross profit per set?
>
> (A) $17.85 (B) $48.58 (C) $11.90 (D) $48.65
> (E) None of these

These items lean heavily upon concepts and vocabulary. True, one cannot answer the second item correctly without some ability to manipulate numbers, but success demands a comprehension of the interrelationships of the concepts "cost," "gross profit," and "selling price." It is this sort of understanding of relationships among concepts which is tested, along with other things, in the Miller Analogies Test. The following example is not untypical and plainly shows how difficult it is to generate test items that are free of cultural or other bias. Imagine an immigrant struggling with this one:

> Palm: Atlantic :: Beach _____
>
> (A) Pacific (B) Shrub (C) City (D) Tree

There are, of course, many variants of this type of testing, and a legitimate complaint might be that items of this sort fail to tap our

abilities to pierce arguments for their flaws and strengths. To some, these abilities are the constituents of critical thinking, and they are well represented in tests bearing that name. The Watson-Glaser Test of Critical Thinking has subtests designed to measure inference, recognition of assumptions, deductions, interpretation, and evaluation of arguments. In the following item, for example, we are asked to judge if the conclusions do or do not follow:

> A report of the US census states that during 1940 there were approximately 1 656 000 marriages and 264 000 divorces granted.
>
> Conclusions:
> (A) Getting a divorce is a quick and easy matter in the United States.
> (B) If the above ratio still holds true, then about six times as many people get married each year as get divorced.
> (C) The divorce rate in the US is much too high.

In another test, we are asked to determine if there is sufficient or insufficient information for the conclusion given:

> A student places two pieces of bread in separate sealed containers. The one is placed in sunlight, the other darkness. After four days, there is mould on the piece of bread placed in sunlight, but no mould on the bread that is in the dark.
>
> Conclusion: Mould needs light to grow.

Actually, it is probably unfair to put this item, which comes from a test that professes to measure science attitudes, so close to one on critical thinking. However, the similarity between the two is pronounced. As evident, the content is scientific, but beneath that, and not buried very deeply, is a straightforward commonsense argument which can be unpicked with straightforward commonsense reasoning. After all, there is nothing particularly scientific about the idea of comparing things in a way that will reduce the possible interference of other factors. This may sound a little strange, for we seem to be edging towards the view that there may be nothing special about scientific reasoning that warrants setting it aside from other sorts of reasoning.

One might even feel that much of what we believe critical thinking in science to be is straightforward puzzle-solving and logic-wielding.

Standard Interpretations of Thinking in Science

Discussions of science curricula frequently refer to the distinction between "science content" and "science process." So far as I can gather, "science content" refers to such things as theories, findings, and the like which, in my schooldays, seemed to be the entire compass of the science curriculum. "Science content" then embraced the properties of sulphur, the atomic theory (or at least one version of it), laws of friction, cell theory, and much, much more. "Science process" is a term applied to what it is thought that scientists do (or did) to generate this vast array of science content. Scientists, we gather, observe carefully, generate and test hypotheses, control variables, retain a staunch allegiance to evidence (rather than to what others might say), and are always prepared to jettison a theory if it fails to serve its purpose. Some of this gets packaged in the familiar wrapping of the "scientific method." Sometimes, the disposition to behave in a way that mimics the ideal scientist gets christened a "scientific attitude." We don't have to look very far to find interpretations of "science process" manifested in test items. For example, here are two selected rather arbitrarily from different tests of science processes:

> 1) Several similar rosebuds were selected for an experiment. Half the buds were placed in a litre of tap water; the other half were placed in a litre of similar tap water in which aspirin had been dissolved. The most general hypothesis the experiment was designed to test was that aspirin
>
> (A) will purify tap water.
> (B) has an effect on rosebuds.
> (C) improves the appearance of rosebuds.
> (D) has the same effect on water as do rosebuds.
>
> 2) In order to prove that "Not all things get bigger as you heat them," which of the following would you need to do?
>
> (A) Find one thing that does not get bigger when it is heated.

(B) Find all the things that do get bigger when it is heated.
(C) Find one thing that gets bigger when it is heated.
(D) Find all the things that get bigger when they are heated.
(E) Find all the things that do not change size when they are heated.

This picture of scientific process or scientific thinking is surprising and tempts one to think that all is well here, especially since the phrase "scientific process" is still very much a part of the science educator's language, even though it gets transformed into such phrases as "scientific attitudes" or "inquiry skills" from one curriculum to another. But that would be a mistaken conclusion. All is not well. A recent research paper on critical thinking illustrates this when it lists a number of fallacies allegedly relevant to the study of inquiry in biology.[1] Among them:

. Assuming that events that follow others are caused by them.
. Drawing conclusions on the basis of nonrepresentative instances.
. Drawing conclusions on the basis of very small and fortuitous differences.

Of course, these fallacies are not the exclusive property of faulty reasoning in science. Errors of this sort can be made by lawyers, historians and investors, to name a few. In fact, there is nothing peculiarly biological about the list at all, for the fallacies are tied to rules of reasoning that are not dependent upon context.

To a very large extent, we have reached the same conclusion here as we did previously, though this time the conclusion was arrived at by examining some examples drawn from the field of science education. There is no longer merely a suspicion here, but a pronounced disquiet,

1. A. Dreyfus and E. Jungwirth, "Students' Perception of the Logical Structure of Curricular as Compared with Everyday Contexts: A Study of Critical Thinking Skills," Science Education, vol. 64, no. 3, pp. 309-321.

for critical thinking looks a lot like the "science process" sort of thinking. Both seem to be varieties of puzzle-solving or logic-wielding.

Actually, when you think about it, there is no reason why the discipline of science should have a monopoly in the critical-thinking market. A detailed study of the letters of Benjamin Disraeli is no less reliant upon systematic and critical thinking than is a thorough investigation of recognition behaviours among fishes. The fact that political theory and ichthyology employ different techniques to investigate different aspects of life provides no grounds for saying that one leans more heavily upon critical thinking than the other. Science, the argument might continue, is as dependent upon critical thinking as are literature, history, and musicology.

The inescapable conclusion so far is that we have exhumed nothing from these conventional ways of talking about thinking that is distinctively scientific. All that we have seen applies equally to other areas of the curriculum. But, before we abandon the view that science education has no particular claim on teaching youngsters to think critically, we need to step back. There must be something distinctive about thinking in science, otherwise science would not stand as a separate discipline.

A Radically Different Approach to Thinking of Scientific Thinking

Looking back on it all, I am astonished that as science educators we have been seduced into believing that thinking in science simply involves puzzle-solving, logic-wielding, and a dash of "scientific method," whatever that might be. It is ironic that we have uncritically adopted for "scientific thinking" a version of "critical thinking." But although puzzle-solving and logic-wielding do not help us distinguish "scientific thinking" from disciplined thinking generally, we must not forsake the quest for what is unique about "scientific thinking." Accordingly, I propose to approach the topic from a star-

tlingly different (though not original) viewpoint. We must begin by looking at what scientific knowledge is all about.

The clearest way to illustrate something of the basis of scientific knowledge is to share another piece of classroom discussion. The following extract is from a grade 4 science lesson. The teacher has been introducing a classification system and has arrived at a distinction between living and nonliving things. The next distinction is just ahead.

Teacher: Now, we are going to leave the nonliving things for later and study just the living things.

(Writes "living" on the board)

... Now, let's divide all the living things into two divisions. Into what two divisions can we divide every living thing? Every living thing is either a _____ or a _____? Lucy, give me one division.

Lucy: People?

Teacher: People are just part of one of the two divisions.

Peter: Plants and animals.

Teacher: Good for you, Peter. That's right. Every living thing in this world is either plant or animal. People, Lucy, are animals, so they fit in this division.

Lucy: People aren't animals, they're humans.

Teacher: People are animals, the same as dogs and cats and so on.

(Much laughter, and several loud objections by a large number of children speaking simultaneously. It appears that they disagree with this last statement.)

... People are animals. What's wrong with that? They're not plants, are they?

Jimmy: But people talk, and have two legs and arms, and move and can think. Animals aren't like that.

(Laughter)

Teacher: People do think, and this makes them one of the highest forms of animals, but they are still animals. . . And other animals communicate with one another.

(Several children are noisy and visibly disturbed)

. . . That's enough. People are animals. Now maybe it would help if we looked at the differences between plants and animals. What are the differences? There are at least three that you could name.

(And the lesson continues.)

Quite obviously, something is going wrong in this lesson. Lucy's contention that people aren't animals is at odds with the teacher's declaration that they are. Of course, there may be many possible cogent explanations of Lucy's emphatic rejection of the teacher's statement, but no satisfactory explanation can be built on the grounds that either Lucy or the teacher is somehow deficient in logic-wielding or puzzle-solving. Some other explanation is called for. I believe the most coherent explanation focuses on language and knowledge.

In Lucy's world, we can imagine, conceptual distinctions have been made between people and animals because it is important to make these distinctions. (Why else would we make distinctions unless they were important to us?) For Lucy, then, people are not animals; their features and habits are different of course, but, more significantly, members of the two sets occupy distinctive positions, probably by virtue of the different relationships she perceives that they have to her. None of this is surprising; indeed, Jimmy appears able to articulate some of the differences that are evident to him in his world. This is quite acceptable, for in our everyday use of language around the home, farm, and streets we wield the conceptual distinctions in precisely the way that Lucy and Jimmy do. Why, then, is Lucy so persistent in pressing her viewpoint?

Perhaps Lucy just has trouble with scientific terminology; but that explanation doesn't push the matter far enough. The essence of

the disagreement is that neither party apparently understands that the concept "animal" is just that, a concept. Further, neither seems to see that the word "animal" is part of two classification systems, or taxonomies: a scientific one, and an "everyday" one. The elements of such systems, which we invent, do not necessarily exhibit unique relationships with what we come across in the world. Indeed, because we construct them for different purposes, it is likely that different taxonomies will give different meanings to specific words. Lucy's taxonomy sorts out her world, and the teacher's taxonomy sorts out the world according to how science sees it. So, both Lucy and the teacher are right, though unknowingly they are each using one part of two taxonomies for different purposes.

In this we see something very fundamental about scientific thinking: it is a human invention which involves using language to paint the perceptual world in a very particular and disciplined fashion. This is the foundation upon which the radically different approach to viewing "scientific thinking" is to be erected.

IV SOMETHING ON THE NATURE OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE

Scientific knowledge is a very specific and disciplined way of constructing the world. According to this view, which we can term "constructionist," we construct our own realities. Some of these realities are widely public; these are the disciplines. In any discipline reality is constructed out of a network of concepts, principles, explanations and theories, which are all human inventions. The sorts of "constructs" that are used, the ways in which they are developed and tested, and the purpose they serve distinguish the disciplines one from another.

The purpose of science is to construct generalized models to explain and predict natural phenomena. The constructions should match data consistently; frequently they must be precisely formulated (often mathematically). And the concepts are meant to be free of willful behaviour. Other disciplines will show differences: history does not strive for claims about human action that can be generalized but for detailed explanations of particular actions. Art constructs a world differently again. As disciplines evolve, so the rules change. Yet disciplines are rule-bound, and thus yield public knowledge which is as strikingly different from private knowledge as Lucy's knowledge is different from her teacher's.

This view of knowledge in science comes from philosophy. A very readable and far fuller account is available in Stephen Toulmin's *The*

Philosophy of Science. For present purposes, his arguments can be set aside and replaced by some thoughts on what this "constructionist" view of scientific knowledge implies.

Are There Really Black Holes? or, "How could you ever tell anybody if you happened into one?"

For me, the most tantalizing concept in contemporary astronomy is the black hole. To some, I am sure, it is deeply puzzling to think that there are "objects" in space which can never be seen, touched, or sensed, simply because they attract so fiercely that nothing escapes their maw, not even light. How, then, do we know they are there? Now that's an awkward question, largely because it's an inappropriate one: we are not really claiming knowledge of their presence when we say there are black holes. Instead, we are claiming that the only coherent way we can explain certain phenomena is if we invent the concept of black holes having properties that do not violate any of the major components of our present construction of the universe. Science is the creation of human beings.

Our total range of concepts are first and foremost language devices. "Genes," "tachyons," " black holes," and "schizophrenia" are terms that have been invented for the specific purpose of satisfying our need to explain and to predict, and to be able to talk to each other about our explanations and predictions. Of course the better the concepts are, the more "real" they seem. (And, indeed, some can eventually be used to describe real entities.) But the basis of scientific knowledge remains firmly fastened to the idea that we invent our knowledge.

Not only are our concepts formulated by ourselves, but so are our theories, explanations, and principles. So it is that theories and explanations are not, strictly speaking, true or false, right or wrong; rather, they conform or do not conform with our observations, and they are judged on their usefulness to our attempts to construct a predict-

able, scientific world about which we can make generalizations. Theories that have fallen into disuse are just that; it's not a matter of their being wrong, it's simply that we have found them to be less useful to us now than they were when they were first developed.

There is an interesting offshoot of the constructionist conception of scientific knowledge which bears directly upon the concerns of science educators. I identify it as the "theories-learned-in-school" syndrome, which appears either in the form of a university student telling a former grade 13 chemistry teacher about discovering that the atomic theory learned in grade 13 was wrong, or in the form of university science teachers complaining that they have to get their first-year students to unlearn all their school chemistry. What seems to have been missed here, by all parties, is that theories or models are not right or wrong but of variable usefulness depending upon the phenomena we wish to explain and the amount of sophistication we wish to build into the model. Presumably, if the constructionist view of knowledge were to prevail, this difficulty at the high school and university interface would be mollified.

If teachers and texts in schools continually made it clear that models and theories of increasing complexity are generated to deal with increasingly diverse and complicated observations, then students entering university would be prepared to anticipate novel and more refined models. If some students are evidently getting the message that part of their high school science is "wrong," then they must have acquired or developed an inadequate and misleading view of scientific knowledge, one that leaves them disadvantaged when it comes to scientific thinking. They can't comprehend the context of scientific knowledge, and are unable to cope with the notion that theories and models change. Imagine trying to tell a youngster that the plum-pudding model of the atom has been supplanted by another, when he or she had no idea as to what went into developing the model in the first place, but learned it in the naive belief that scientists really knew

what the atom was like. "Scientists were wrong! My teachers were wrong!" There would be no intellectual engagement, just bewilderment and distrust.

V THE CONTEXT OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE: EDUCATION OR INDOCTRINATION?

The constructionist view demands we recognize that the language we use in conveying science to youngsters will determine whether or not they understand scientific knowledge. The crucial point is the context of the language, the significant elements of which are:

1. Knowledge is constructed by people.

2. Theories, principles, explanations, models and postulated entities are constructed by us, and not handed to us by nature.

3. The nature of these constructions is controlled by a set of rules: among these is the determination that the construction fit the data it is intended to deal with.

Out of this flows the necessary and unavoidable implication that science has not the logical commerce with absolute truth people might have thought. Psychologically, it may be very appealing and satisfying to think that science provides a hot-line to reality. But the fact is that it doesn't, even though scientists and others may well find themselves driven zealously by a passion for uncovering absolute truth. This is part of the psychology of science. From a logical point of view, though, the discipline of science strives for something importantly different from absolute truth: it strives for increasingly useful constructions of nature upon which predictions and generalizations can be based. This is not to say that at some point we are not entitled to develop our own thoughtful judgments about the relationships between scientific constructions and reality. Undoubtedly, as we

develop intellectually, so we develop more sophisticated beliefs about our own views. But this point is not to be taken as offering aid and comfort to science educators who are committed to the view that science really does tell us what goes on in the perceptual world. On the contrary, the science teacher must be sure to present scientific knowledge in such a way that his or her students can begin to develop an understanding of its basis.

Any teaching that denies students access to what makes science tick automatically limits their opportunity to make a deliberate and fully reasoned judgment about their own beliefs. In the classroom, whatever pre-empts the learner's judgments can only be characterized as miseducational, if not indoctrinaire.

The Importance of Making Context Clear

The preceding brief journey into the nature of scientific knowledge demonstrates how important it is to make explicit the context of language used in teaching and in curriculum materials. At base, we need to become accustomed to talking in such a way that a plain distinction is always made between what we have invented (in the way of concepts and theories) and what nature has given us. Without the separation the context of scientific knowledge is lost.

This point is crucial. We can't let it pass without taking a look at a fragment from another lesson, this time grade 9. In a previous extract we saw a striking example of how the meaning of language in science can be so different from that of our everyday conversation. But do youngsters pick up that difference, and so fully possess the fundamentals of scientific and critical thinking, or does it wash over them? You be the judge.

"Heating Mercuric Oxide"

The dialogue occurs after an "experiment" in which samples of mercuric oxide were heated in test tubes by students. Predictably enough, the

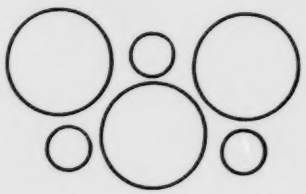
teacher has managed to get the class to agree that the oxygen which rekindled the glowing splint came from the mercuric oxide. Let's join the discussion.

Teacher: But how is the oxygen in mercuric oxide? Mercuric oxide doesn't look like oxygen. Mercuric oxide doesn't look like mercury. So how can it have mercury and oxygen inside it? Paul.

Paul: When, er, when you get a solid, all the molecules are tightly attached; when you heated it, it split up.

Teacher: So, what Paul thinks is this. When we have mercuric oxide, we've got molecules of mercury and molecules of oxygen all packed in here tightly like this.

(He draws a diagram.)

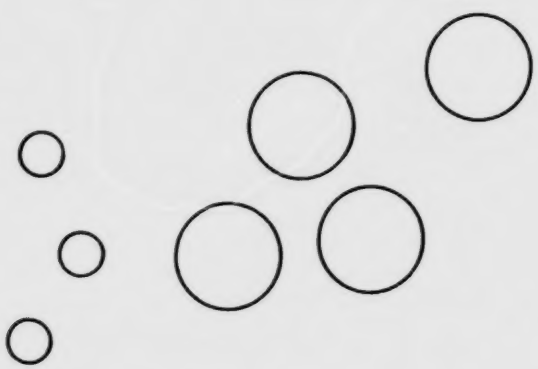


Then when we heat this up, what's going to happen to this, Paul?

Paul: It's going to start breaking up... will start sort of breaking apart.

Teacher: They're going to start breaking apart, and we'll get the molecules of mercury over here, and the molecules of oxygen over here.

(He draws.)



They'll separate. Does that seem reasonable?

This is fascinating. In one swift step we move to an explanation of chemical change that relies heavily on a familiar language, though the language itself (as we know, but the youngsters may not) carries with it a vast and intricate conceptualization of molecular structure and kinetics. There is nothing in the language that signals to the listeners and participants that it moves between conceptualization and data. These significantly different parts of the discipline of science are here inseparably joined, and all concerned are left with no choice but to think that this "breaking down of a molecule" is what really happens when we heat this orange stuff. (In talking with the teacher, I discovered that the context of scientific knowledge had not been explained in previous instruction either.) We can see how easy it is for the language of the science classroom to thoroughly misrepresent the basis of scientific knowledge.

VI HOLDING SCIENTIFIC KNOWLEDGE

The ability to think critically in science and about science must be firmly based on an understanding of how the English language is used in science and how its context is to be taken as a construction of reality. But it's not enough to let the matter rest here, for there are other essential components to disciplined scientific thinking which contribute to how we hold scientific knowledge. Thus, if we want our students to acquire a facility in scientific and/or critical thinking, these factors should be transmitted to them.

Probably, the reader's initial reaction will be: "Ah, now we get to the part about the five steps of the scientific method." Wrong. Quite frankly, I find the "scientific method" very tiresome. First, the history of science shows that the scientific method does not seem to lead to mind-boggling conceptual novelties. (In fact, we are likely forced to describe such "discoveries" according to a logical step-wise progression simply because it is far easier to follow a tale when it is told like that. An ex post facto explanation of how we solved puzzles similar to those given earlier probably doesn't come close to describing what we might think happened in our heads.) Second, in just the same way that science doesn't have the corner on the critical thinking market, it doesn't have the corner on the scientific method market. Indeed, there is every good reason to think that the monopoly is held elsewhere, in the international corporate giant of all disciplined intellectual inquiry.

I hold that, basic to critical thinking in science (and, I admit, in every intellectual sphere), is the ability to make judgements for oneself. This is a serious undertaking, and must be approached with responsibility and thoughtfulness. As a result, it is necessary to set the notion of making judgements for oneself distinctly apart from other ideas about scientific thinking or critical thinking. This is done by inventing the idea of intellectual independence, which we can define in the following way:

> A person can be said to be intellectually independent when he or she has all the resources necessary for judging the truth of knowledge independently of other people.

Doubtless, professional scientists use this capability when they study research papers. They know the theoretical background to the research, and so can judge whether or not the reported experimental work is apt. Also, they use their understanding of the relationship between evidence and theory, of what constitutes adequate evidence, and of flawless argument, to assess the significance of the research. Of course, for the scientist, a basic part of intellectual independence comes from an understanding of the language of science, both its content and, more importantly, its context.

We can represent on a scale the ways in which people hold scientific knowledge. At one extreme will be those who naively and uncritically accept every piece of scientific knowledge as absolutely true, without giving any thought to the grounds which make that knowledge acceptable to the scientific community. At the other extreme will be those whose understanding of the nature of scientific knowledge permits them to view knowledge as made by us, and whose familiarity with the disciplinary rules of science gives them the wherewithal to make sound and independent judgements about knowledge.

In the face of the quantity of information generated in the discipline, it is obviously desirable to equip all science students,

whether they plan to specialize in science or not, with the means for being intellectually independent about science. How can this be done?

Another Look at "Heating Mercuric Oxide"

The focus here again needs to be on teaching, with emphasis on what can be learned because it is provided in the teaching. We can get a good feel for what needs to be present in teaching, if it is to provide intellectual independence, by examining some further extracts from "Heating Mercuric Oxide."

This extract occurs close to the beginning of the lesson. Here students are reporting their observations.

> Teacher: How many other people observed a red stage in here?
>
> (Several hands are raised.)
>
> ... Okay, so I guess those are our observations: a sort of a, a dark, brick red color and then slowly going to black, eh? Jackie.
>
> Jackie: Ours turned from the red to brown . . .
>
> Teacher: Jackie said her test tube turned a kind of brown color as well. It might have been because the test tube was dirty.
>
> Jackie: Just a brown color.
>
> Teacher: Did you notice it in spots around, or was it all that color?
>
> Jackie: It was just spots around.
>
> Teacher: That might be because your test tube might have been a bit dirty. If it had been the whole thing, then maybe, but not that way.
>
> (The teacher proceeds to another point.)

It may well be the case that Jackie's observation fails to coincide with our expectations of the way nature ought to behave, yet the fashion in which it is ruled as irrelevant bears no resemblance to how we operate scientifically. For Jackie, her observation is irrelevant

because the teacher said so, and it is plain that she is offered no choice here but to be intellectually dependent upon her teacher for judgements about the worth of her observation.

The next, and last, extract follows shortly after the very first one, in which the circles were drawn. The teacher has just made the point that the mercuric oxide splits up in a way that is quite different from what happens when water is heated and converts to water vapour.

Teacher: Instead of thinking of mercuric oxide as being molecules of oxygen packed closely to molecules of mercury, let's think of mercuric oxide, since it's matter - mercuric oxide's matter. How do we know mercuric oxide is matter? Ruth?

Ruth: All matter is molecules?

Teacher: Well, do we know mercuric oxide is molecules? George.

Ruth: Yes.

Teacher: Have you seen one? How do we know mercuric oxide is matter? George.

George: Because it has weight and takes up space.

Teacher: Good. Now if mercuric oxide is matter, what's it made up of? Jackie.

Jackie: Molecules.

Teacher: So let's figure out . . .

(Draws the diagram and labels it "Mercuric oxide molecule.")

... We've got a mercuric oxide molecule here. . . That's a mercuric oxide molecule. It's got a bump on it. Can you think what that bump could be?

Richard (quietly): A growth.

Teacher: Linda.

Linda: Oxygen.

Teacher: Well, what's this big part then?

Linda: Mercury.

Teacher: Okay.

(Labels the parts of the diagram "mercury" and "oxygen.")

... Mercury and oxygen what? Mercuric oxide could be made up of mercury and oxygen. But mercury and oxygen what? Stan.

Stan: Molecules?

Teacher: No. There's another possibility. . . . If it isn't made up of molecules, what's it made up of? It . . .

Ann: Atoms.

The teacher then moved to a description of what happens when this "thing" is heated. There was no discussion of the model itself.

Two points are worth making here. First is the absence of any real argument to establish that mercuric oxide is considered to exist as a molecule instead of, say, a form of conglomeration of smaller molecules. Ruth, George, and Jackie who are supplying the "correct" missing links, perhaps sense that their participation serves only to take the teacher along his own agenda. Richard's sotto voce "a growth" seems fitting, and gives rise to the second point: nothing whatsoever is done for the students so they can see that this representation has any validity at all.

There is no attempt to make the model appear plausible by showing how we think it fits the data. Instead, the central model in the teacher's presentation is parachuted into the discussion in such a way that the students are left intellectually dependent upon the teacher for most of the argument. Here, perhaps more clearly than elsewhere,

we see that assessing argument (using critical thinking) is not just a matter of wielding logic or solving puzzles. To judge what is available to this grade 9 class, we have to view the argument from a perspective which incorporates an understanding of the nature of scientific knowledge and thinking. From that angle we are obliged to acknowledge that there is little or no opportunity here for youngsters to develop and use intellectual independence. Moreover, the language itself offers a distorted view of how to argue scientifically.

Intellectual Independence

In my collection of science lesson transcripts there are many more examples of teaching that leave youngsters intellectually dependent upon their teacher. For now we can pass over these and, by reflecting on what we have seen, come to list the sorts of moves a teacher has to adopt to encourage intellectual independence. When the following features are present in teaching, we can be assured that something is being done to show how scientific knowledge is appropriately held and handled:

a) Evidence is provided in support of claims.

b) The argument is present.

c) Correspondence of diagram or model to phenomena is demonstrated by argument and by evidence.

d) Adequate reasons are given for accepting or rejecting a student's statement or response.

e) Suggestions, questions, and objections by students are honoured and are treated with regard to reason.

f) There is provision for students to make judgements, by recourse to phenomena, about the viability of models, theories, and explanations.

g) Alternative models, theories, and explanations are provided to permit students to make judgements among them.

h) Discrepancies in observations or evidence are rationally resolved.

Recall also that scientific knowledge is constructed by human beings and, by extension, our theories, principles, explanations, constructions and postulates are too. Our constructs are controlled by rules, among these being the determination that the constructions fit the data.

Teaching and curriculum materials which voice these points clearly provide youngsters with what is fundamental to thinking critically and scientifically.

VII ENDINGS AND BEGINNINGS

It is likely that the points made in this paper may not be acceptable to everyone. So, rather than ending with a flourishing summary, I wish to note down some of the more contentious points in a way that is designed to provoke discussion. In addition, I will suggest some practical steps that can be taken to investigate some of the issues, and to address them in science teaching. (References listed at the end may be helpful to you.)

Let us begin with the argument itself.

1. The argument started with an account of the growth of knowledge:
   a) In your teaching area or area of interest, how much has knowledge grown over the last five or ten years?

2. Next, I argued that most of what we mean by critical or scientific thinking is basically puzzle-solving and logic-wielding.
   a) Can you find examples of "thinking" in lessons, quizzes, or classroom tests and assignments which cannot be seen as puzzle-solving and logic-wielding?
   b) Try taping and transcribing a lesson, and then ask, "What sorts of thinking appear to be demanded by the teacher?"

3. I steadfastly avoided any reference to the psychology of thinking or "how people think," because this literature is connected very largely to the sorts of thinking manifested in the test items already seen, and for the following reason: The effort to build theories which explain human thinking is not entirely relevant to education, because theories that answer the question "How do you think?" simply cannot come close to answering the question "How should we think?" What do you think?

4. I demonstrated that the basis of scientific knowledge had to do with understanding that science constructed a world. This, I claimed, ought to be evident in the way we speak of concepts, theories and explanations as being formulated by humans.

   a) What are the dangers, if any, of failing to provide youngsters with an appropriate understanding of the context of scientific knowledge?
   b) What is an appropriate context?
   c) What do youngsters currently understand about the nature of scientific knowledge? (See below for ways to investigate this question.)

5. Last, I urged that science teaching make provision for youngsters to be intellectually independent so that they have the equipment to make judgements about scientific knowledge for themselves.

   a) Does teaching currently make provision for intellectual independence? Do textbooks? (See below for some suggestions for answering these questions.)
   b) If we don't stimulate intellectual independence, are we miseducating our youngsters? (This demands a consideration of what we mean by "education.")
   c) Can we, and should we, be intellectually independent? (This leads to the broader question of what it means to live as a responsible member of society, abiding by its conventions.)

What is the Present State of Affairs?

My argument has been illustrated with examples drawn from science lessons. No pretence is being made that these excerpts represent the contemporary state of science teaching; instead, the material draws attention to certain features of intellectual independence and the context of the language of science by pointing to dialogue and asking, "What can learners get from this?" Yet, one cannot read transcripts like these without wondering how much of science teaching resembles such excerpts and what youngsters currently understand about the nature of scientific knowledge. Here are two rather different approaches that you can take to getting a feel for the present state of affairs.

1. The first approach is to examine some teaching. You begin by identifying a science teacher who is willing to have you tape a lesson. (It could be one of your own lessons.) Tape the lesson, and then transcribe it. Next use the features of intellectual independence and your knowledge of the context of the lesson to analyze the transcription to see whether it provides for intellec-

tual independence or intellectual dependence. This work will take some time, and you may wish to repeat it for other lessons. If your interest in this approach to analyzing educational phenomena is sparked, try the same sort of technique on a few chapters of the science textbooks that are presently used in school science programs at all levels. I won't be so presumptuous as to predict what you'll find, but I'll hazard a guess that you'll be very intrigued.

2. The second approach asks, "Why don't we try to describe how youngsters in science courses understand terms like theory, model, scientific law, principle, and concept?" This is not as easy as it might sound, because if we simply ask youngsters to explain what is meant by "theory" (by giving them a questionnaire, say), then we may get a stilted definition of what they think we want them to know a theory to be. All of this will be given without the context of their understanding. So, the procedure must be clinical. One approach would be to work with a single youngster, posing the following sorts of questions with a tape recorder running:

    a) When we speak of Newton's laws of motion, what do you think is meant by "law"?
    b) What sort of thing is a theory in science? You can use an example to explain to me what you understand the term "theory" to mean.
    c) When we talk in science about "fundamental particles" (or any other conceptual entity the interviewer thinks may elicit interesting information) what do you think a scientist means? Does he or she mean that these particles are really there, or is there some other implication?

Questions like these will need to be followed by others in an effort to thoroughly grasp what the student understands. This is a lengthy process, and a single interview of say, 45 minutes may turn out to serve no other function than to show how the interviewing techniques could be improved. You might want to work with children of different ages to get an idea of a developing understanding. When all the tapes are collected, they must be carefully listened to, and if you think that the children's understanding is inadequate, it is the clearest indicator of a problem for science education to address.

What Changes Can be Made?

A great difficulty with what I'm advocating is the real chance that curriculum change will be thwarted simply because there is insufficient time to add anything on the nature of scientific knowledge to an already overburdened curriculum. I want to take two different approaches to this problem, the first being more abrupt than the second.

If what I have said about the fundamentals of scientific thinking is truly valuable, then it has to be incorporated within the school science curriculum. If this curriculum is already full, then some of the material must be discarded, to be replaced by units which introduce students to the nature of science. This could probably be achieved in the junior and intermediate levels without great loss. Certainly, such units must be available to all students, whether or not they plan to specialize in science, because leaving the matter until grade 12 or 13 is somewhat akin to closing stable doors after the horses have escaped. However, major changes like this are unlikely to take place, and an alternative ought to be offered for consideration.

There is no reason why great strides towards intellectual independence cannot be made through minor adjustments to our present teaching. We must speak of theories as inventions, we must remind learners that scientific constructions are models of reality and not more, and we must be sure that we offer evidence for our claims and deal with our students' contributions in a rational manner. In short, we must discard the motto "Don't do as I do, but do as I say" and make "Do as I do" a template for our teaching.

This sort of approach can be run through a year's programs, but it will reach learners only if they have a context for the language. So it is important during a course, particularly at the beginning, to set time aside (perhaps one or two periods) for teaching very clearly the nature of scientific theories. This can be achieved without loss of precious "content-time" by working an <u>emphasis</u> on the nature of science

into the first unit of a course. (Sources for this type of approach are given below.) In this way, we can be confident that our teaching coincides with the basis of scientific thinking and so allows students to pick up and use this significant facility.

Below, I suggest a few questions that could be considered when beginning a new course or unit:

1. Is it possible to adapt the first few lessons in several units throughout a course, and especially at the beginning of a course, so that an emphasis on the nature of science is provided?

2. What sorts of teaching content and strategy would work well here?

3. (For those who do attempt to make a change as indicated in questions 1 and 2.) On the basis of talking with youngsters individually, do you detect a better understanding of the nature of scientific knowledge?

APPENDIX: AN ANNOTATED LIST OF SOURCES

Hugh Munby, "Analyzing Teaching for Intellectual Independence," in Seeing Curriculum in a New Light: Essays From Science Education, ed. Hugh Munby, Graham Orpwood and Thomas Russell, Ontario Institute for Studies in Education, Toronto, 1980. This paperback is aimed at those interested in a variety of educational phenomena. The chapter cited here contains a full treatment of intellectual independence, along with a substantial analysis of transcribed lessons.

Hugh Munby, "Some Implications of Language in Science Education," Science Education, vol. 60, no. 1, 1976. My paper takes Toulmin's account of the nature of scientific knowledge and applies it to some extracts from science textbooks. The failure of the texts to indicate the special context of language in science and the confusing implications for a reader is revealed.

Douglas Roberts, The Mole as an Explanatory Concept: How Do You Know a Mole if You See One?, Department of Curriculum, Ontario Institute for Studies in Education, Toronto, 1972. This booklet is a sample teaching unit expressly designed to give emphasis to the nature of science when teaching the mole concept. It contains text material and corresponding discussion material.

Douglas Roberts and Graham Orpwood, Properties of Matter: A Teacher's Guide to Alternative Versions, Ontario Institute for Studies in Education, Toronto, 1979. The real strength of this publication,

from the Intermediate Science Curriculum Project, is that it shows how a lesson can be taught in three different ways, each to give a particular and different emphasis. The first of these is the "Nature-of-Science Emphasis."

Stephen Toulmin, The Philosophy of Science: An Introduction, Harper and Row, New York, 1960. Available in paperback, this book contains the most readable account of the nature of scientific knowledge that I know. The approach taken is to examine geometric optics, and the language is not technical. The book would make excellent required reading for science students in grades 12 and 13, and for first-year university students.

What is Scientific Thinking?

by Hugh Munby

A Discussion Paper

Science Council of Canada

March 1982

Qu'est-ce que la pensée scientifique?

par Hugh Munby

Exposé à débattre

Conseil des sciences du Canada

Mars 1982

Every educator in Canada recognizes "the gravity of the challenge to get our students to think, to think critically, and even to think scientifically. Certainly it is abundantly clear . . . that science education fails if it doesn't tackle the matter of thinking." To this end, a very fundamental and specific aspect of "scientific thinking" and "critical thinking" can and must be part of the discourse of science teaching itself.

What is Scientific Thinking? by Hugh Munby, is the fourth in a series of discussion papers prepared as part of a study of Canadian science education being undertaken by the Science Council of Canada. In this paper Munby, an experienced teacher and teacher educator, takes a fresh look at what it means to try to get students to *think* critically and scientifically. He believes "intellectual independence" should be an important aim for all science teaching.

In an early chapter, "The Knowledge Explosion: A Problem for Teachers and Students Alike," the author argues we must clarify what we mean by scientific thinking. Scientific knowledge is now growing at such a rate it is imperative we understand more about knowledge itself.

There is much more to scientific thinking (or critical thinking in science) than puzzle-solving and logic-wielding. Munby illustrates this with straightforward examples of "thinking" taken from transcripts of classroom experience. The examples reveal that what we mean by "thinking" in the context of science education cannot show us what, fundamentally, students need to know in order to think scientifically.

A consideration of scientific knowledge follows, with an emphasis on its very specific and disciplined approach and how it differs from other kinds of knowledge. Munby discusses the constructionist idea of scientific knowledge, in which theories and concepts are considered valid if they enable us to build a predictable, scientific world. As he notes, "If teachers and texts in schools continually made it clear that models and theories of increasing complexity were generated to deal with increasingly diverse and complicated observations, then students entering university would be prepared to anticipate more novel and more refined models. If some students are evidently getting the message that part of their high school science is "wrong," then they must have acquired or developed an inadequate and misleading view of scientific knowledge, one that leaves them disadvantaged when it comes to scientific

Au Canada, chaque enseignant a pris conscience de «l'importance capitale d'entraîner les jeunes à réfléchir, à montrer un esprit critique et à penser de façon scientifique. Il est bien évident que l'enseignement des sciences n'atteint pas son but s'il ne provoque pas la réflexion». Pour y parvenir, il faut inscrire l'aspect tout fondamental d'une formation particulière à la pensée scientifique et à l'esprit critique dans l'enseignement des sciences.

L'exposé de M. Hugh Munby, **Qu'est-ce que la pensée scientifique?** constitue le quatrième Exposé à débattre d'une série rédigée pour les besoins de l'Étude sur l'enseignement des sciences, réalisée sous les auspices du Conseil des sciences du Canada. Dans son Exposé, M. Munby, professeur expérimenté et formateur d'enseignants, étudie d'un œil neuf la sensibilisation des élèves au *raisonnement* scientifique et à l'esprit critique. Il estime que la «réflexion indépendante» constitue un objectif souhaitable de l'enseignement des sciences.

Dans le premier chapitre intitulé: «La marée montante des connaissances à l'assaut des professeurs et des élèves», l'auteur souligne qu'il faut clarifier la signification de l'expression «marée des connaissances scientifiques». Celle-ci monte si rapidement qu'il est devenu indispensable de mieux appréhender la connaissance elle-même.

La pensée scientifique (ou l'esprit critique en matières scientifiques) englobe beaucoup plus que la résolution des problèmes et le maniement de la logique. M. Munby le montre bien avec des exemples simples de raisonnement enregistrés au cours d'une classe de sciences. Ces exemples révèlent que ce que nous entendons par «raisonnement», dans le cadre de l'enseignement des sciences, ne peut montrer ce que les jeunes doivent savoir pour raisonner de façon scientifique.

L'auteur examine ensuite ce qu'est la connaissance scientifique, en insistant sur ses aspects spécifiques et systématiques, et sur ce qui la distingue d'autres genres de connaissances. Il examine ensuite le concept de perspective constructiviste, dans le cadre duquel les théories et les concepts sont considérés comme valides s'ils nous permettent de construire un modèle scientifique et utilisable de la réalité qui nous entoure. Comme il l'indique: «Les professeurs et les manuels scolaires des niveaux secondaire et collégial devraient constamment souligner qu'on élabore des théories plus complexes et qu'on perfectionne les modèles pour tenir compte d'observations de

Munby goes on to discuss the *context* of scientific knowledge and, in this regard, the special meaning of language in science education. With the aid of examples, he makes it clear scientific knowledge must be conveyed in such a way that students can begin to develop a sure understanding of its basis.

The paper continues with a discussion of what it means to "hold" scientific knowledge, inseparable as this is from the ability to think critically. Munby emphasizes that intellectual independence — the ability of people to make judgements for themselves — should be encouraged. Munby states, "In the face of the quantity of information generated in the discipline, it is obviously desirable to equip all science students, whether they plan to specialize in science or not, with the means for being intellectually independent about science." To this end, and as part of the larger purpose of promoting dialogue about thinking critically and scientifically, Munby suggests practical teaching methods and approaches that emphasize the importance of incorporating the fundamentals of scientific thinking in the Canadian school science curriculum.

étudiants de 1ère année s'attendraient-ils à considérer des modèles nouveaux et plus subtils. Si certains étudiants sont convaincus que les connaissances scientifiques acquises à l'école secondaire son en partie «fausses», c'est qu'ils ont manifestement développé une conception inexacte et trompeuse des sciences, qui les désavantage au moment de réfléchir scientifiquement».

L'auteur poursuit en examinant le *contexte* de la connaissance scientifique, et plus particulièrement l'influence particulière du niveau de langue utilisé dans l'enseignement des sciences. À l'aide d'exemples, il montre qu'il faut transmettre la connaissance scientifique de façon à communiquer aux élèves une appréhension précise de ses fondements.

M. Munby continue son exposé par une étude du statut épistémologique de la connaissance scientifique. Il souligne que la réflexion indépendante, capacité de l'élève à juger par lui-même, devrait être encouragée, et il déclare qu'«il est évidemment souhaitable, à cause de la marée des connaissances scientifiques, d'assurer que tous les élèves des classes de sciences, même s'ils ne se destinent pas à une carrière en ce domaine, acquièrent l'indépendance intellectuelle».

En vue de lancer le débat au sujet de l'esprit critique et de la pensée scientifique, l'auteur propose des améliorations aux méthodes pédagogiques et met en relief la nécessité d'enseigner les fondements de la pensée scientifique dans le cadre du programme d'enseignement des sciences des écoles canadiennes.

Science Council of Canada **Conseil des sciences du Canada**

100 Metcalfe
Ottawa K1P 5M1 Canada

For a copy of **What is Scientific Thinking?** please return this order form.

Pour recevoir un exemplaire de **Qu'est-ce que la pensée scientifique?** veuillez nous retourner ce bulletin de commande.

Name/Nom _____

Street/Rue _____

_____

City/Ville _____ Province _____ Code _____

© Minister of Supply and Services Canada

© Ministre d'Approvisionnements et Services Canada

Canada

QU'EST-CE QUE LA PENSÉE SCIENTIFIQUE?

Exposé à débattre
rédigé par Hugh Munby

Mars 1982

Les exposés à débattre sont des documents de travail que le Conseil des sciences du Canada met à la disposition des personnes ou groupes intéressés, en quantité limitée, pour connaître leurs réactions.

Les vues exprimées dans le présent Exposé sont celles de l'auteur; elles ne reflètent pas nécessairement l'opinion du Conseil des sciences du Canada.

Vous pouvez vous procurer gratuitement des exemplaires de:

QU'EST-CE QUE LA PENSÉE SCIENTIFIQUE?

auprès du:

Service des publications
Conseil des sciences du Canada
100, rue Metcalfe,
Ottawa, Ont. K1P 5M1

Copies of What is Scientific Thinking? are also available free of charge

©Ministre d'Approvisionnements et Services Canada, 1982

N° de catalogue SS21-4/6-1982F
ISBN 0-662-91615-8

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 5

I. INTRODUCTION 7

II. LA MARÉE MONTANTE DES CONNAISSANCES À L'ASSAUT DES PROFESSEURS ET DES ÉLÈVES 10

III. CONSIDÉRATIONS SUR LA PENSÉE 12
Les philosophes morts et enterrés et autres énigmes 12
Tests de raisonnement en général 14
Interprétations courantes de la pensée scientifique 16
Une conception radicalement différente de la pensée scientifique 19

IV. SUR LA NATURE DE LA CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE 23
Existe-t-il vraiment des trous noirs? ou "Comment le faire savoir si jamais l'on s'y trouve?" 24

V. LE CONTEXTE DE LA CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE: FAUT-IL FORMER OU ENDOCTRINER L'ÉTUDIANT? 27
La clarté du contexte 28
"Le traitement thermique de l'oxyde mercurique" 28

VI. LE STATUT ÉPISTÉMOLOGIQUE DE LA CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE 31
Encore la leçon sur "Le traitement thermique de l'oxyde mercurique" 33
L'indépendance intellectuelle 36

VII. LES POINTS D'ARRIVÉE ET DE DÉPART 38
Quelle est la situation actuelle? 39
Quelles sont les améliorations possibles? 41

Annexe - Liste d'ouvrages à consulter, avec remarques 43

AVANT-PROPOS

Le présent document constitue le quatrième exposé à débattre d'une série rédigée pour les besoins de l'Étude sur l'enseignement des sciences au Canada, réalisée sous les auspices du Conseil des sciences, et sous la supervision de son Comité de l'enseignement des sciences. Cette Étude, entreprise au printemps de 1980, vise trois grands objectifs:

- établir une base de données concernant les objectifs actuels et les caractéristiques générales de l'enseignement des sciences dans les établissements canadiens;
- faire une analyse historique de l'enseignement des sciences au pays;
- encourager le débat concernant l'orientation à donner à cet enseignement.

Comme le suggère l'énoncé de ce troisième objectif, le Conseil des sciences ne s'est pas encore formé une opinion au sujet de cette réorientation, mais il cherche à le faire en demandant l'opinion des divers responsables. Il espère que ces vues, présentées dans des documents de travail et diffusées le plus largement possible, inciteront les enseignants des sciences et autres responsables à reconsidérer leurs objectifs et leurs méthodes. En participant à cet effort de réflexion et en analysant systématiquement les lignes de conduite et les façons de procéder suivies actuellement et par le passé, le Conseil des sciences souhaite arriver à une juste appréhension de la situation et des besoins de l'enseignement des sciences au Canada, et être ainsi en mesure de formuler des recommandations utiles.

Les documents précédemment publiés dans cette série ont mis en relief certains objectifs importants de l'enseignement des sciences, dont certains sont absents des programmes scolaires canadiens, a-t-on souligné. J.E. Page, dans son exposé: Un contexte canadien pour l'enseignement des sciences, a mis en relief les possibilités offertes par les cours de sciences pour mieux sensibiliser les Canadiens aux questions scientifiques; G.S. Aikenhead, par contre, a souligné dans son exposé: L'enseignement des sciences dans une perspective sociale, que les sciences devraient être enseignées de façon à montrer aux élèves leur pertinence et leurs limitations à l'égard des questions sociales et politiques. Le troisième exposé: L'enseignement des sciences vu par un ingénieur, rédigé par D. George, souligne que les processus mentaux de l'ingénieur doivent être pris en considération tout autant que ceux du scientifique au moment de circonscrire les objectifs de l'enseignement des sciences.

Le présent Exposé suit une approche un peu différente en reconsidérant un objectif dont les professeurs de sciences connaissent depuis longtemps l'importance. M. Hugh Munby, professeur expérimenté et formateur d'enseignants, étudie d'un oeil neuf la sensibilisation des élèves au raisonnement scientifique et à l'esprit critique. En illustrant largement cet Exposé grâce à des extraits de leçons enregistrées, il propose de donner à l'enseignement des sciences, entre autres, la mission de former les élèves à la réflexion indépendante.

Il convient de souligner que les vues exprimées dans le présent Exposé sont celles de l'auteur, et qu'elles ne correspondent pas forcément à celles du Conseil des sciences ou du Comité de l'enseignement des sciences. Le Conseil estime toutefois que l'auteur a présenté une thèse bien étayée, et que sa diffusion contribuera aux progrès de l'Étude en cours et de l'enseignement des sciences au Canada.

James M. Gilmour,
Directeur de la recherche,
Conseil des sciences du Canada

INTRODUCTION

Bien que je sois un collectionneur enthousiaste d'enregistrements et de transcriptions de cours de sciences, je n'en possède pas qui témoigne de mes propres cours, lorsque j'enseignais au secondaire. Je garde, toutefois, un vif souvenir d'une de ces leçons. Immigrant frais débarqué au Canada, professeur débutant dans toute l'acception du terme, j'allais commencer mon premier cours de chimie. J'avais toutes les apparences d'un professeur de sciences, car j'arborais alors une blouse bien propre et je me tenais, l'air déterminé, derrière la table de manipulation réservée au professeur. J'avais donc l'autorité et la confiance que ces attributs confèrent et, de plus, je croyais vraiment savoir, à titre de professeur de sciences dûment diplômé, en quoi consiste le monde physique. Comme si ces grands airs ne suffisaient pas, j'annonçai sur un ton théâtral et avec le meilleur accent britannique que: "Même si vous n'appreniez rien d'autre dans cette classe, vous allez au moins apprendre à penser". Et je me lançai dans une leçon sur les orbitales et la structure de l'atome, laissant mes élèves en panne loin derrière moi. Mais peu après, je me rendis compte avec chagrin que je n'avais pas la moindre idée de ce que j'entendais par "apprendre à penser".

Ai-je besoin de souligner que la "réflexion" devrait être la préoccupation de tout enseignant? Si nous devions tous suivre scrupuleusement les objectifs de l'enseignement des sciences désignés par l'administration scolaire, la seule tâche d'amener nos élèves à se servir de leur cerveau nous enliserait complètement. Mais, trêve de plaisanteries: nous reconnaissons pour nos élèves l'importance capitale de réflé-

chir, de montrer un esprit critique, et même de penser de façon scientifique. Il est bien évident pour moi que l'enseignement des sciences n'atteint pas son but s'il ne provoque pas la réflexion.

Toutefois, il faut avoir une idée claire de ce que nous entendons par "esprit critique" et "pensée scientifique", sinon ces expressions presque impossibles à concrétiser sous forme de méthodes pédagogiques et de moyens didactiques resteront vides de sens. Je crois qu'il existe déjà trop de slogans pédagogiques, et c'est pourquoi j'estime qu'il faut envisager les aspects fondamentaux et particuliers de ces expressions dans le cadre de l'enseignement des sciences, pour éviter de les utiliser mal à propos.

Pour commencer, je soulignerai l'urgence de se faire une idée claire de ce qu'est le raisonnement scientifique. C'est que la marée des connaissances monte si vite qu'il est impératif pour tous de savoir comment les utiliser. J'examinerai ensuite le thème général du présent Exposé: le raisonnement scientifique (ou l'esprit critique en sciences) ne se confine pas à la résolution des problèmes et à l'exercice de la logique. J'éviterai à dessein de présenter un exposé philosophique et psychologique trop détaillé sur la nature de la réflexion, et j'utiliserai plutôt des exemples simples de ce qui passe apparemment pour de la réflexion. Ces exemples montreront que la description traditionnelle du "raisonnement" dans l'enseignement des sciences ne suffit pas à mettre en relief les connaissances de base nécessaires pour réfléchir de façon vraiment scientifique.

Il faudra, ensuite, décrire ce qu'est la connaissance scientifique. À partir de ce fondement, nous pourrons envisager ce que signifie l'acquisition des connaissances scientifiques, et nous en illustrerons les points principaux grâce à des extraits de leçons de sciences. Ainsi verrons-nous ce que l'enseignement des sciences doit offrir aux élèves pour qu'ils acquièrent l'esprit scientifique.

Comme il me semble qu'un exposé à débattre doit encourager la discussion, je mentionnerai un certain nombre de questions à examiner. J'espère que cette liste ne restreindra nullement l'ampleur du débat, pas plus que les propositions et les aspects pratiques, et que les échanges d'idées seront animés.

II LA MARÉE MONTANTE DES CONNAISSANCES À L'ASSAUT DES PROFESSEURS ET DES ÉLÈVES

Les années 1970 resteront marquées dans notre souvenir, ne serait-ce que par les graves problèmes (peut-être insolubles) qu'elles nous ont posés: pollution de l'environnement et intoxication de notre organisme, problèmes moraux posés par l'ingénierie génétique, épuisement graduel des combustibles fossiles, promesses douteuses de la filière électronucléaire et "marée des connaissances". Tous ces problèmes ont des aspects scientifiques, et ils exigent que les citoyens soient capables de comprendre les données scientifiques pour les évaluer et trouver des solutions réfléchies. Mais, à mon avis, c'est la marée montante des connaissances qui pèse le plus lourdement sur les épaules des professeurs de sciences et des élaborateurs de programmes d'études à tous les niveaux.

J'hésite personnellement à utiliser des expressions comme "la marée des connaissances", sans offrir de statistiques à l'appui. J'ai donc cherché à évaluer cet accroissement avec l'aide du bibliothécaire documentaliste de l'Université Queen's. Les résultats sont éclairants, comme les exemples suivants le montrent:

- Le nombre total des documents cités dans les *Chemical Abstracts* est passé de 239 687 en 1967 à 306 906 en 1980.
- En 1927, les *Biological Abstracts* citaient 14 506 documents, et 162 500 en 1980.
- Dans le domaine de la mécanique quantique, *Chemical Abstracts* répertoriait 634 documents en 1967, et environ 1 180 en 1980.
- Selon un membre de l'Académie des sciences de l'URSS, on publie de huit à dix millions de pages de textes scientifiques ou techniques chaque année dans le Monde.

Je ne vois vraiment pas comment un professeur de sciences pourrait absorber toute cette information, et rester suffisamment sensible aux progrès accomplis dans sa discipline pour communiquer des connaissances actuelles à ses élèves. Je songe également avec étonnement au volume énorme d'information complémentaire que les diplômés des niveaux secondaire, collégial et universitaire devront assimiler au cours de leur vie professionnelle. Comment y arriveront-ils? Je crois que le meilleur moyen de les aider consiste à inculquer aux élèves un esprit critique à l'égard de l'information scientifique, afin qu'ils puissent la choisir intelligemment. Je ferai toutefois des réserves sur notre interprétation habituelle de l'esprit critique et du raisonnement scientifique. Elle pourrait être tout à fait erronée.

III CONSIDÉRATIONS SUR LA PENSÉE

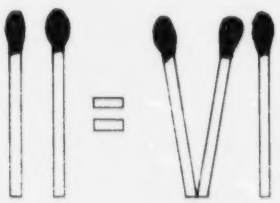
Notre définition de la "pensée" est ambiguë et obscure. Ce terme a traditionnellement permis d'englober toute une gamme de processus mentaux, depuis les pensées flottantes du promeneur jusqu'à la réflexion systématique que le joueur d'échecs, le raisonneur ou le professeur s'efforce de poursuivre. Comme il n'est guère possible de fournir une définition à la fois large et satisfaisante de la "pensée", je donnerai quelques exemples de son utilisation. Ils contribueront, sans doute, à préciser ce que nous croyons faire lorsque nous réfléchissons.

Les philosophes morts et enterrés et autres énigmes

> L'âge du navire est deux fois celui qu'avait sa chaudière lorsque le navire avait l'âge que la chaudière a maintenant. La somme de leurs âges est de 49 ans. Quels sont les âges respectifs du navire et de la chaudière?

Les problèmes de ce genre piquent notre curiosité. Ils nous demandent un peu d'effort pour les résoudre; mais c'est relativement aisé dès qu'on a trouvé la façon appropriée d'appliquer les règles et les algorithmes convenables. Par contre, pour certains problèmes, les règles de résolution sont fort peu évidentes. Dans les définitions énigmatiques des mots croisés, par exemple, on désigne en général la mole par "contient toujours le nombre d'Avogadro"; mais quelles sont les règles qui s'appliquent pour trouver le mot décrit par "ancien philosophe exhumé en début de journée"?

L'utilisation des règles est donc un trait caractéristique du raisonnement; mais s'y confiner peut entraîner des difficultés, lorsque des problèmes inédits exigent une modification du mode habituel de réflexion. Par exemple: "Il y a trois ereurs dans cette frase". Pouvez-vous les trouver? Et, dans la représentation ci-dessous, ne déplacez qu'une allumette pour que l'élément gauche de l'équation égale l'élément droit (il existe deux solutions tout à fait différentes):



On nous dira peut-être que des problèmes de ce genre n'existent pas dans l'enseignement des sciences. Si, ils s'y présentent. Nous savons tous qu'enseigner aux élèves à résoudre les équations chimiques, à calculer l'intensité du courant qui traverse un circuit simple, à évaluer la vitesse d'un véhicule se déplaçant sans résistance sur un plan incliné, etc., fait partie intégrante de la pédagogie des sciences. Considérez par exemple, l'échange suivant, tiré du début d'une leçon de dernière année du secondaire*:

Le professeur: $1s^2\ 2s^2\ 2p^5$. Que représente cette expression?

Michel: du fluor?

Le professeur: c'est l'atome de fluor, n'est-ce pas? et l'ion de fluor?

(c'est le silence, suivi de quelques marmonnements).

* Tous les dialogues mentionnés ici sont réels, seuls les noms des participants ont été changés.

Élisabeth: $2p^6$.

Le professeur: $2p^6$, le néon? Élisabeth, puisque vous êtes en si bonne voie ...

(La leçon continue).

La résolution des problèmes constitue assurément l'une des facettes du raisonnement, bien qu'en lui-même celui-ci recouvre un domaine plus large.

Tests de raisonnement en général

Le nombre considérable de tests qui ont été mis au point dans l'intention expresse de mesurer la capacité de réflexion sous ses diverses formes montre l'envergure de cette faculté. Voici deux questions incluses dans la version canadienne d'un test d'intelligence largement utilisé:

On ne peut séparer la cause de l'effet, les moyens de la fin, la semence de _____

A) prudence B) pensée C) fruit D) science
E) philosophie

Le prix de vente d'un poste radio de table a été fixé à 29,75 $. Le prix coûtant représente 60 pour cent du prix de vente établi. Quel est le profit brut du marchand sur chacun des postes vendus?

A) 17,85 $ B) 48,58 $ C) 11,90 $ D) 48,65 $
E) Aucune des réponses ci-dessus

Ces questions se fondent largement sur les concepts et le vocabulaire. Il est vrai qu'on ne peut résoudre la deuxième question sans avoir quelque aptitude à jongler avec les chiffres, mais pour y répondre correctement il faut comprendre les notions de "prix coûtant", de "profit brut" et de "prix de vente". C'est ce genre d'appréhension des rapports existant entre les notions exprimées que le test analogique de Miller permet d'évaluer. L'exemple qui suit est commun, et montre comme il est difficile d'élaborer des tests exempts de toute charge d'ordre

culturel ou autre. Imaginez un immigrant aux prises avec le test suivant:

Palm: Atlantic:: Beach _____
A) Pacific B) Shrub C) City D) Tree

Il existe, bien entendu, plusieurs variantes de ce genre de test, et il est aisé de montrer qu'elles ne réussissent pas à mesurer les capacités de l'individu à discerner les faiblesses et les points forts d'une argumentation. Pour certaines personnes, ce sont ces capacités qui constituent l'esprit critique, et elles sont bien évaluées par les tests correspondants. Le "Test Watson-Glaser d'esprit critique" comprend des tests auxiliaires destinés à quantifier les inférences, l'identification des hypothèses et des déductions, l'interprétation et l'évaluation de l'argumentation. Dans celui qui suit, par exemple, on demande au sujet d'apprécier si les conclusions découlent logiquement ou ne découlent pas des prémisses mentionnées:

Un rapport sur le recensement aux États-Unis déclare qu'au cours de l'année 1940, il y a eu environ 1 656 000 mariages et 264 000 divorces.

Conclusions:
A) L'obtention d'un divorce aux États-Unis est une question facile et rapide à régler.
B) Si la proportion exprimée ci-dessus est toujours vraie, il se produit donc, chaque année, environ six fois plus de mariages que de divorces.
C) Le taux de divorce aux États-Unis est beaucoup trop élevé.

Dans un autre test auxiliaire, on demande au sujet d'établir si les prémisses fournies sont suffisantes pour en tirer la conclusion mentionnée:

Un élève met un morceau de pain dans deux contenants distincts fermant hermétiquement. L'un est exposé au soleil, l'autre se trouve à l'ombre. De la moisissure apparaît au bout de quatre jours sur le morceau de pain qui a été exposé au soleil, mais non sur celui qui se trouvait à l'ombre.

Conclusion: pour se développer, la moisissure a besoin de lumière.

Il n'est probablement pas valable de placer cette question, tirée d'un test qui prétend quantifier le raisonnement scientifique, juste après celle qui porte sur l'esprit critique. Toutefois, leur ressemblance est grande, car leur contenu est d'ordre scientifique; mais il cache, assez mal d'ailleurs, une argumentation simple qui peut être disséquée au moyen d'un raisonnement basé sur le simple bon sens. Après tout, la comparaison d'objets en excluant l'action d'autres facteurs n'a rien de particulièrement scientifique. Il peut sembler paradoxal de soutenir qu'un raisonnement scientifique n'a rien de particulier qui nécessiterait qu'on le distingue de toute autre forme de réflexion, et on pourrait même estimer qu'une bonne partie de ce qui passe pour de l'esprit critique en sciences n'est que la résolution de problèmes et le simple maniement de la logique.

Interprétations courantes de la pensée scientifique

Les débats sur les programmes de formation scientifique distinguent souvent le "contenu scientifique" de la "méthode scientifique". Le "contenu scientifique", à ce qu'on me dit, porte sur les théories, les conclusions et autres questions du même ordre qui, du temps où j'allais en classe, semblaient constituer le champ complet du programme d'études scientifiques. Il englobait aussi bien les propriétés du soufre, la théorie atomique (la version d'alors) que les lois du frottement et la théorie cellulaire, et bien d'autres choses. La "méthode scientifique" qualifie ce qu'on pense que les scientifiques font (ou ont fait) pour produire tout ce contenu scientifique. Les scientifiques, dit-on, font des observations soigneuses, émettent des hypothèses, les vérifient, limitent les variables, restent fidèles à la preuve (plutôt qu'aux dires éventuels d'autres personnes) et sont toujours prêts à rejeter la théorie qui se révèle insuffisante. C'est ce qu'on qualifie généralement de "méthode scientifique". La tendance à singer le comportement du scientifique idéal devient l'"attitude scientifique". Nous n'avons pas à chercher très loin pour trouver des interprétations de la "méthode scientifique" dans certains tests. En voici deux, choisis arbitrairement:

1) On choisit plusieurs roses en bouton semblables pour réaliser une expérience. On en met la moitié dans un vase rempli d'eau du robinet, et l'autre moitié dans un vase de la même eau, dans laquelle on a dissout un cachet d'aspirine. L'expérience vise à vérifier si l'aspirine:

a) purifie l'eau du robinet;
b) agit sur les boutons de rose;
c) améliore l'apparence des boutons de rose;
d) agit sur l'eau de la même façon que sur les boutons de rose.

2) Afin de prouver que "les objets ne se dilatent pas tous sous l'action de la chaleur", laquelle des actions suivantes devriez-vous effectuer?

a) Trouver un objet qui ne se dilate pas sous l'action de la chaleur.
b) Trouver tous les objets qui se dilatent visiblement sous l'action de la chaleur.
c) Trouver un objet qui se dilate sous l'action de la chaleur.
d) Trouver tous les objets qui se dilatent sous l'action de la chaleur.
e) Trouver tous les objets dont les dimensions ne changent pas sous l'action de la chaleur.

Cette illustration de la méthode scientifique ou du raisonnement scientifique est surprenante, et elle nous incite à croire que tout va bien, d'autant que l'expression "méthode scientifique" est toujours la pierre angulaire du langage du professeur de sciences, même si elle apparaît sous les formes d'"attitude scientifique" ou de "capacité d'investigation" dans les divers programmes d'études. Mais c'est là une impression erronée, car certaines choses vont mal. La preuve en est donnée dans un récent rapport de recherches sur l'esprit critique, qui cite un certain nombre de sophismes courants parmi les chercheurs en biologie[1], et entre autres:

. Présumer que certains événements qui en suivent d'autres sont imputables à ces derniers.

1. A. Dreyfus et E. Jungwirth, "Students' Perception of the Logical Structure of Curricular as Compared with Everyday Contexts: A Study of Critical Thinking Skills", dans Science Education, vol. 64, n° 3, pp. 309-321.

- Tirer des conclusions sur la base de circonstances non représentatives.
- Tirer des conclusions sur la base de différences infimes et fortuites.

Bien entendu, ces sophismes ne sont pas réservés au faux raisonnement scientifique. Ils peuvent être admis par des avocats, des historiens ou des investisseurs, entre autres. Ces sophismes n'ont rien de particulièrement biologique, car ils sont liés à des règles de raisonnement qui ne dépendent pas du contexte.

Nous sommes ainsi parvenus à une conclusion très semblable à celle que nous avions exposée antérieurement mais, cette fois-ci, grâce à l'examen attentif de quelques exemples tirés de l'enseignement des sciences. Le doute fait maintenant place à une inquiétude sérieuse, car l'esprit critique ressemble beaucoup à la "méthode scientifique". Il semble que ce soient deux variétés de processus de résolution des problèmes et d'exercice de la logique.

En effet, il n'y a pas de justification à une monopolisation de l'esprit critique par les disciplines scientifiques. L'étude fouillée des lettres de Benjamin Disraeli repose tout autant sur la critique systématique qu'une investigation complète du comportement d'acceptation réciproque chez les poissons. Bien que le politicologue et l'ichtyologue emploient des techniques différentes pour explorer divers aspects de la vie, on ne peut dire que l'une se fonde plus sur l'esprit critique que l'autre. Les sciences, si l'on poursuit cette argumentation, paraissent aussi dépendantes de l'esprit critique que le sont la littérature, l'histoire et la musicologie.

La conclusion inéluctable est que, jusqu'ici, nous n'avons rien trouvé dans ces descriptions du raisonnement qui soit proprement scientifique. Tout s'applique également à d'autres disciplines enseignées. Mais avant d'abandonner l'idée que l'enseignement des sciences n'a pas de titres particuliers à la formation de l'esprit critique des élèves,

il nous faut faire une pause. Le raisonnement scientifique doit offrir quelques caractéristiques particulières, sinon on ne considérait pas les sciences comme une discipline distincte.

Une conception radicalement différente de la pensée scientifique

En y pensant bien, je m'étonne que les professeurs (dont je suis) aient pu croire que le raisonnement scientifique consiste simplement dans la résolution des problèmes, l'exercice de la logique et un brin de "méthode scientifique", quelle que soit celle-ci. Il est paradoxal que nous ayons adopté, sans réfléchir, une version de "l'esprit critique" pour du "raisonnement scientifique". Bien que la résolution des problèmes et l'exercice de la logique ne puissent servir à distinguer le "raisonnement scientifique" de la réflexion systématique en général, il ne faut pas renoncer à chercher ce qui est particulier au premier. Je propose donc d'aborder le sujet d'un point de vue tout à fait différent, s'il n'est pas original. Considérons d'abord en quoi consiste la connaissance scientifique.

Le meilleur moyen d'illustrer la nature de celle-ci est de rapporter le déroulement d'une autre leçon de sciences, celle-ci de quatrième année. L'instituteur présente un système de classification, et il vient de faire une distinction entre le monde animé et le monde inanimé. Il s'efforce maintenant d'en établir une autre:

> L'instituteur: Eh bien, nous allons reporter l'étude du monde inanimé à plus tard et nous en tenir uniquement à celle du monde animé.
>
> (Il écrit le mot "animé" au tableau).
>
> ... Répartissons maintenant le monde animé en deux catégories. Quelles sont les deux catégories dans lesquelles peut être rangé tout ce qui est animé? Tout ce qui est animé est soit une _____, ou un _____?
>
> Lucie, nomme-moi une catégorie?
>
> Lucie: Les gens?

L'instituteur: Les gens ne forment qu'un segment de l'une des deux catégories.

Pierre: Les plantes et les animaux.

L'instituteur: Très bien, Pierre. C'est ça. Tout ce qui est animé ici-bas est soit une plante, soit un animal. Les gens, Lucie, sont des animaux, donc ils entrent dans cette dernière catégorie.

Lucie: Les gens ne sont pas des animaux; ce sont des êtres humains.

L'instituteur: Les gens sont des animaux tout comme les chiens, les chats, ainsi de suite.

(Un grand éclat de rire se fait entendre et plusieurs objections sont formulées à haute voix par un grand nombre d'enfants qui parlent tous en même temps. Il semble bien qu'ils ne soient pas d'accord avec cette dernière assertion).

... Les gens sont des animaux. Qu'avez-vous à redire à cela? Les gens ne sont pas des plantes, n'est-ce pas?

Jacques: Mais les gens parlent, ont deux jambes et deux bras, se déplacent et peuvent penser. Les animaux ne sont pas comme ça!

(Éclat de rire général)

L'instituteur: Les gens ont la faculté de penser, et cela leur donne une supériorité sur les autres espèces animales, mais ils demeurent toujours des animaux... Et d'autres animaux communiquent entre eux.

(Plusieurs enfants s'agitent et sont visiblement troublés)

... Ça suffit. Les gens sont des animaux. Eh bien, cela nous aiderait peut-être si nous considérions les différences qui existent entre les plantes et les animaux. Quelles sont ces différences? Il y en a au moins trois que vous pourriez signaler...

(Et la leçon continue).

De toute évidence, quelque chose ne tourne pas rond dans cette leçon. L'assertion de Lucie selon laquelle les gens ne sont pas des animaux montre bien qu'elle ne partage pas l'avis de l'instituteur. Bien sûr, on peut trouver plusieurs explications pertinentes au refus catégorique de Lucie de partager l'avis de ce dernier, mais il est futile de dire que l'un ou l'autre est sans doute dépourvu d'aptitude à résoudre des

problèmes et à raisonner logiquement. Il faut envisager une autre explication. À mon avis, la plus cohérente est celle qui fait appel au langage et aux connaissances.

Nous pouvons penser que, pour Lucie, il faut distinguer entre les gens et les animaux parce que c'est important. (Autrement, pourquoi ferions-nous ces distinctions, si elles ne l'étaient pas?). Donc, pour Lucie, les gens ne sont pas des animaux: les caractéristiques et les habitudes des deux groupes sont différentes, bien sûr; mais, ce qui importe davantage, c'est qu'ils occupent des situations distinctes, découlant probablement de leurs rapports apparents avec Lucie. Rien de tout cela n'étonne; de fait, Jacques paraît capable d'énoncer quelques-unes des différences qui sont évidentes pour lui. C'est tout à fait acceptable car, dans l'utilisation quotidienne que nous faisons de la langue à la maison, à la ferme et dans la rue, nous établissons des distinctions conceptuelles comme le font précisément Lucie et Jacques. Pourquoi donc Lucie tient-elle à un point de vue différent de celui de l'instituteur?

Il se peut que la difficulté qu'elle éprouve provienne de la terminologie scientifique; mais cette explication n'approfondit pas les causes du désaccord. Celui-ci tient essentiellement à ce que ni l'une ni l'autre partie ne comprennent apparemment que le concept d'"animal" n'est précisément qu'un concept, et qu'il est utilisé à deux niveaux de langue différents: l'un, scientifique et l'autre, "usuel". Les éléments de ces deux systèmes linguistiques sont artificiels, et ne recoupent pas nécessairement la réalité. Et parce qu'ils ont été construits pour des fins différentes, ils donneront à certains mots bien précis des sens différents. La classification utilisée par Lucie appartient au monde qui lui est familier et celle de l'instituteur découle des connaissances scientifiques. C'est pourquoi Lucie et l'instituteur ont tous deux raison, bien qu'à leur insu ils utilisent un aspect de leurs propres classifications à des fins différentes.

Nous avons ainsi mis en relief une caractéristique fondamentale du raisonnement scientifique: il a été inventé par l'Homme, et suppose l'emploi d'un langage pour traduire d'une façon très particulière et systématique l'environnement que celui-ci perçoit. C'est sur cette observation qu'on doit se fonder pour envisager le concept de "raisonnement scientifique".

IV SUR LA NATURE DE LA CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE

La connaissance scientifique constitue un outil rigoureux d'appréhension systématique de l'univers. Dans cette perspective, que nous pouvons qualifier de "constructiviste", nous élaborons des modèles de la réalité. Quelques-uns sont de notoriété publique: ce sont les disciplines. Toute discipline se fonde sur un réseau de concepts, de principes, d'explications et de théories, qui sont tous d'invention humaine. Le genre de modèle utilisé, son mode d'élaboration et de mise en oeuvre, et l'objectif visé distinguent les disciplines les unes des autres.

Le scientifique s'efforce d'élaborer des modèles généraux pour expliquer et annoncer les phénomènes naturels. Ces modèles doivent correspondre étroitement aux observations; il faut qu'ils soient décrits avec précision (souvent grâce aux mathématiques) et les concepts doivent être exempts de parti pris. Des attitudes différentes transparaissent dans les autres disciplines: l'historien ne cherche pas à établir des modèles généraux de l'activité humaine; il s'efforce plutôt de donner l'explication détaillée de certaines actions. Les arts concrétisent une autre vision du Monde. À mesure que les disciplines évoluent, les règles changent, en continuant toutefois à régir les premières, qui débouchent sur un savoir public fort différent du savoir des spécialistes, tout comme les connaissances de Lucie diffèrent de celles de son instituteur.

Cette perspective sur la connaissance scientifique s'appuie sur l'épistémologie. On en trouvera une description claire et bien plus détaillée dans l'ouvrage de Stephen Toulmin: The Philosophy of Science. Pour les fins de la présente étude, nous pouvons négliger son argumentation et la remplacer par des réflexions sur cet aspect "constructiviste" de la connaissance scientifique.

Existe-t-il vraiment des trous noirs? ou "Comment le faire savoir si jamais l'on s'y trouve?"

C'est le concept des trous noirs qui me fascine en astronomie. Je suis sûr que certains sont fort troublés par l'existence éventuelle d'"objets" sidéraux qu'on ne peut voir ou percevoir autrement, simplement parce que la gravitation y est si grande que rien n'y échappe, pas même la lumière. Comment savons-nous qu'ils existent? C'est une question bien embarrassante, surtout parce qu'elle est peu pertinente: les astronomes n'affirment pas vraiment que les trous noirs existent dans l'Univers, quand ils disent que c'est la seule hypothèse cohérente permettant d'expliquer certains phénomènes; et ils confèrent à ces trous noirs des propriétés qui ne contredisent aucune des principales caractéristiques de notre modèle d'Univers. Car c'est l'Homme qui élabore les concepts scientifiques, et lui seul.

Tous nos concepts sont avant tout des créations langagières. Les "gènes", les "tachyons", les "trous noirs" et la "schizophrénie" sont des mots inventés dans l'intention expresse de satisfaire notre besoin d'expliquer, de prévoir et de pouvoir parler entre nous de nos explications et de nos prévisions. Bien entendu, meilleurs sont les concepts, mieux ils semblent exprimer la réalité (quelques-uns même peuvent décrire des objets). Mais c'est notre invention de la connaissance qui reste le fondement même des sciences.

Non seulement élaborons-nous les concepts, mais nous faisons de même pour les théories, les explications et les principes. Ainsi les théories et les explications ne sont-elles pas, à proprement parler, vraies

ou fausses, exactes ou erronées; elles concordent ou non avec les observations, et les scientifiques les évaluent en fonction de leur utilité pour l'élaboration d'un modèle de la réalité observée à partir duquel ils pourraient faire des généralisations. Certaines théories ont été abandonnées non parce qu'elles étaient erronées, mais simplement parce qu'elles sont maintenant moins utiles que lors de leur formulation.

De la conception constructiviste de la connaissance scientifique découle une conclusion intéressant directement les professeurs de sciences. Les théories sont enseignées à l'école comme des dogmes, et l'on voit un étudiant dire à son ancien professeur de chimie du secondaire que la théorie atomique qu'il lui a enseignée est erronée; de même, certains professeurs des départements universitaires de sciences sont obligés de demander à leurs étudiants d'oublier les notions de chimie inculquées au secondaire. Tous semblent ignorer (ou avoir oublié) que les théories ou les modèles ne sont ni vrais ni faux, mais qu'ils constituent des outils plus ou moins utiles pour expliquer un phénomène. Si le concept constructiviste prévalait, l'articulation secondaire-université pour l'enseignement des sciences grincerait moins.

Les professeurs et les manuels scolaires des niveaux secondaire et collégial devraient constamment souligner qu'on élabore des théories plus complexes et qu'on perfectionne les modèles pour tenir compte d'observations de plus en plus diverses et fouillées; ainsi, à l'université, les étudiants de 1ère année s'attendraient-ils à considérer des modèles nouveaux et plus subtils. Si certains étudiants sont convaincus que les connaissances scientifiques acquises à l'école secondaire sont en partie "erronées", c'est qu'ils ont manifestement développé une conception inexacte et trompeuse des sciences, qui les désavantage au moment de réfléchir scientifiquement. Ils ne peuvent saisir le contexte de la connaissance scientifique et sont désarçonnés par l'évolution des théories et des modèles. Comment le professeur peut-il expliquer à ces étudiants que le modèle atomique de Thomson a été remplacé par un autre, alors que ces jeunes gens n'ont pas la moindre idée de la façon dont on

est arrivé à concevoir le premier modèle, et croient ingénument que les scientifiques savaient vraiment à quoi ressemble l'atome? Ces étudiants concluraient simplement que les scientifiques et les professeurs se complaisent dans l'erreur, et qu'il est inutile de développer ses connaissances. L'étonnement et la méfiance seraient à l'ordre du jour.

V LE CONTEXTE DE LA CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE: FAUT-IL FORMER OU ENDOCTRINER L'ÉTUDIANT?

Les principes du constructivisme font que le langage servant à enseigner les sciences aux jeunes déterminera s'ils saisissent ou non la nature de la connaissance scientifique. C'est le contexte du langage qui constitue le point important. En voici les paramètres:

1. La connaissance scientifique est d'invention humaine.

2. Les théories, les principes, les explications, les modèles et les abstractions sont construits par les scientifiques, et nullement communiqués par la Nature.

3. Les particularités de ces constructions sont régies par un ensemble de règles; entre autres, il leur faut correspondre aux données de l'observation.

Il en résulte inévitablement que les sciences n'ont pas les rapports logiques qu'on imaginait avec la vérité absolue. Il peut être attrayant et satisfaisant de croire que les sciences assurent cette appréhension directe de la réalité. Mais ce n'est pas le cas, même si les scientifiques et d'autres personnes, emportés par la passion de la découverte, cherchent à atteindre la vérité absolue. Cela fait partie de la mentalité scientifique. Sur le plan logique, toutefois, les sciences visent à découvrir quelque chose de bien différent de la vérité absolue: des modèles de la Nature de plus en plus utiles pour fonder sur eux des prévisions et des généralisations. Cela n'exclut nullement une évaluation des rapports entre modèle scientifique et réalité, à un moment donné. À mesure de nos progrès intellectuels, nous acquérons une opinion mieux fondée au sujet de nos propres convictions. Mais cette observation ne

conforte nullement les professeurs de sciences s'efforçant de montrer que les sciences nous informent vraiment de ce qui se passe dans l'univers perceptible. Au contraire, il leur faut présenter la connaissance scientifique à leurs élèves de façon à leur en faire saisir les fondements réels.

Tout enseignement n'éclaircissant pas la nature de l'édifice scientifique empêche les élèves de faire une évaluation raisonnée de leurs propres convictions. Et toute limitation de la latitude de jugement des élèves est anti-éducative, sinon carrément dogmatique.

La clarté du contexte

Cette courte analyse de la nature de la connaissance scientifique montre l'importance de la clarté du langage utilisé dans l'enseignement et dans les moyens didactiques. Il faut, dès le début, faire une nette distinction entre ce que nous inventons (en fait de concepts et de théories) et ce que la Nature nous montre; sinon, on supprime le contexte de la connaissance scientifique.

Or, il s'agit d'un point crucial. Pour l'illustrer, voyons un extrait d'une autre leçon de sciences, de 9^{e} année cette fois-ci. Grâce à un extrait précédent, nous avons montré la différence frappante entre langage quotidien et langage scientifique. Mais les jeunes perçoivent-ils cette différence et acquièrent-ils ainsi les fondements du raisonnement scientifique et de l'esprit critique, ou cela leur passe-t-il par-dessus la tête? Voici cet extrait:

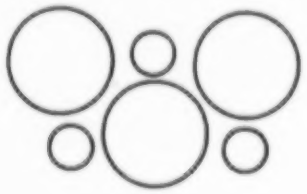
"Le traitement thermique de l'oxyde mercurique"

Le dialogue qui suit a pris place à la suite d'une expérience au cours de laquelle certains élèves ont fortement chauffé de faibles quantités d'oxyde mercurique dans des éprouvettes. Comme prévu, le professeur a montré aux élèves que l'oxygène qui avait ranimé la combustion du fragment de bois introduit dans l'éprouvette provenait de l'oxyde mercurique ainsi traité:

Le professeur: Mais comment l'oxygène se trouve-t-il incorporé dans l'oxyde mercurique? Cette substance ne ressemble nullement à l'oxygène, ni au mercure. Dans ce cas, comment cette substance peut-elle contenir du mercure et de l'oxygène? Paul?

Paul: Eh bien, voyons: dans un solide, toutes les molécules sont liées étroitement; quand on l'a chauffé, il s'est divisé.

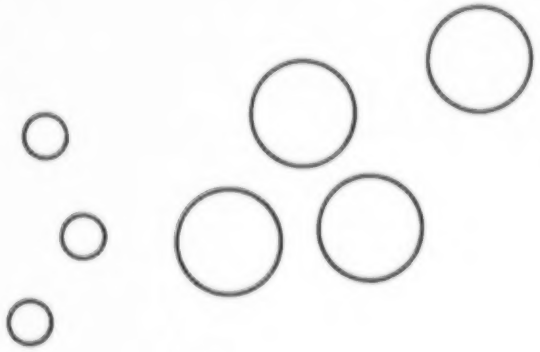
Le professeur: Voici donc ce qu'en pense Paul. L'oxyde mercurique est formé de molécules de mercure et de molécules d'oxygène entassées, comme cela: (Il trace un diagramme.)



Ensuite, lorsqu'on chauffe cette substance, que va-t-il se produire, Paul?

Paul: Elle va commencer à se fragmenter... en différentes parties.

Le professeur: Les constituants vont commencer à se séparer et l'on obtiendra ici, des molécules de mercure et là, des molécules d'oxygène: (Il fait un dessin.)



Ces éléments vont se séparer. Cela vous semble-t-il normal?"

L'exposé est fascinant. En quelques instants le professeur explique la transformation chimique de la matière en langage familier, et ce langage véhicule des concepts complexes sur la structure et la cinétique moléculaires sans que les élèves le sachent nécessairement. Rien n'indique que l'on passe des données observées aux concepts et vice versa. Ces aspects fort différents des sciences sont ici associés inséparablement, et les intéressés n'ont d'autre choix que de penser que cette "dissociation des molécules" est vraiment ce qui se produit lorsqu'on soumet ce solide orange à l'action d'une forte chaleur. (En parlant avec le professeur, j'ai découvert que le contexte de la connaissance scientifique n'avait pas non plus été expliqué lors d'une leçon antérieure). Nous voyons comme il est aisé, par le truchement du langage d'enseignement des sciences, de dénaturer complètement les fondements de la connaissance scientifique.

VI LE STATUT ÉPISTÉMOLOGIQUE DE LA CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE

L'esprit critique en sciences et à propos des sciences doit s'étayer sur une connaissance précise de l'utilisation du langage commun dans les sciences, et sur la façon dont le contexte dans lequel ce langage est utilisé élabore un modèle de la réalité. Mais il ne faut pas en rester là, car d'autres éléments sont nécessaires au raisonnement scientifique rigoureux, et ceux-ci nous aident à attribuer un statut à la connaissance scientifique. Il faut donc communiquer ces éléments aux élèves pour qu'ils acquièrent le raisonnement scientifique ou l'esprit critique.

Le lecteur pense sans doute que nous allons maintenant traiter des cinq étapes de la "méthode scientifique". Ce n'est pas le cas car, franchement, nous la trouvons très fastidieuse. L'histoire des sciences montre que la méthode scientifique ne semble pas engendrer des concepts renversants. (Nous serons vraisemblablement obligés de décrire les "découvertes" qui en sont issues selon une progression logique, tout simplement parce qu'il est beaucoup plus facile de suivre un récit lorsqu'il se déroule de cette façon. Une explication rétrospective de la résolution des problèmes scientifiques semblables à ceux déjà mentionnés décrit probablement fort mal ce qui s'est réellement passé dans le cerveau des intéressés). Tout comme les sciences ne monopolisent pas l'esprit critique, elles n'ont pas d'exclusivité sur la méthode scientifique. Il y a tout lieu de penser que le monopole est détenu ailleurs, parmi la collectivité internationale des chercheurs.

Je soutiens que c'est la capacité de jugement personnel qui constitue le fondement de l'esprit critique en sciences (comme d'ailleurs dans

toutes les disciplines intellectuelles). Cette évaluation doit être abordée de façon sérieuse et réfléchie, séparément d'autres considérations sur la pensée scientifique ou l'esprit critique. On peut y parvenir en inventant le concept d'indépendance intellectuelle, que nous définissons comme suit:

> L'indépendance intellectuelle est la possession de toutes les ressources nécessaires pour juger individuellement de la véracité de toute connaissance.

Il est certain que les scientifiques praticiens utilisent cette capacité pour analyser les rapports de recherche. Ils connaissent les fondements théoriques des travaux et peuvent donc évaluer la pertinence des résultats obtenus. De même se fondent-ils sur leur appréhension des rapports entre théorie et faits observés, leur caractère probatoire et la logique d'une argumentation pour évaluer la validité des recherches effectuées. Bien entendu, l'indépendance intellectuelle du scientifique se fonde surtout sur la connaissance du langage des sciences, tant sur le plan du contenu que, à un degré plus important, sur celui du contexte.

Nous pouvons représenter graphiquement le statut accordé à la connaissance scientifique. À l'extrémité de la courbe, on trouve ceux qui considèrent simplement et sans esprit critique toute connaissance scientifique comme vraie, sans analyser les motifs qui les rendent acceptables à la collectivité scientifique; à l'autre extrême se groupent ceux qui se rendent compte de l'origine humaine de toute connaissance scientifique, et qui peuvent aboutir à un jugement judicieux et indépendant à son sujet, à cause de la pertinence de leur fonction.

Il est évidemment souhaitable, à cause de la marée des connaissances scientifiques, d'assurer que tous les élèves des classes de sciences, même s'ils ne se destinent pas à une carrière en ce domaine, acquièrent l'indépendance intellectuelle. Mais comment y arriver?

Encore la leçon sur "Le traitement thermique de l'oxyde mercurique"

C'est encore sur le contenu de l'enseignement qu'il faut mettre l'accent, car il fournit ce qu'il est possible d'apprendre. En examinant un autre extrait du début de la leçon sur "Le traitement thermique de l'oxyde mercurique", nous prendrons conscience de ce qu'il faut inclure dans ce contenu.

Les élèves, ici, font part de leurs observations.

Le professeur: Combien d'autres élèves ont remarqué que la substance fortement chauffée devenait rouge pendant quelque temps?

(Plusieurs mains se lèvent).

... Parfait, voilà donc nos observations: la substance prend une couleur rouge brique assez foncée, puis passe lentement au noir; n'est-ce pas Jacqueline?

Jacqueline: La mienne est passée du rouge foncé au marron...

Le professeur: Jacqueline dit que la substance contenue dans son éprouvette a pris une teinte plutôt marron. Est-ce que son éprouvette était sale?

Jacqueline: C'était seulement une teinte marron.

Le professeur: Avez-vous observé des taches de cette couleur, ou tout était-il uniformément marron?

Jacqueline: Seulement des taches.

Le professeur: L'éprouvette était sans doute un peu sale. Si la substance était uniformément de cette couleur, ce serait intéressant, mais pas sous forme de taches.

(Le professeur passe à une autre observation).

Il se peut que Jacqueline ait fait une observation qui ne corresponde pas exactement à la réaction chimique prévue. Mais la fin de non-recevoir qui lui est opposée ne correspond nullement à la démarche scientifique. C'est parce que le professeur l'a dit que l'observation de Jacqueline n'est pas valable, et il est clair qu'elle n'a pas d'autre choix que de dépendre intellectuellement de l'avis de son professeur.

Nous allons présenter un dernier extrait (suivant juste le tracé des graphiques) de la leçon sur le traitement thermique de l'oxyde mercurique. Le professeur vient de souligner que cette substance se comporte de façon toute différente de celle de l'eau, qui se transforme en vapeur sous l'action de la chaleur.

Le professeur: Au lieu de considérer l'oxyde mercurique comme un composé de "molécules" d'oxygène intimement liés à des "molécules" de mercure, pensons-y comme à une substance -- des molécules d'oxyde de mercure. Comment savons-nous que l'oxyde mercurique est composé de molécules? Renée?

Renée: Tous les composés ne sont-ils pas formés de molécules?

Le professeur: Savons-nous si l'oxyde mercurique est formé de molécules?

Renée: Oui

Le professeur: Georges, En avez-vous vu une? Comment savons-nous que l'oxyde mercurique est une substance?

Georges: À cause de son poids et de son volume.

Le professeur: Bien répondu. Alors! Si l'oxyde mercurique est une substance, de quoi se compose-t-elle, Jacqueline?

Jacqueline: De molécules!

Le professeur: Dans ce cas, représentons-la.

(Il trace un diagramme et l'intitule "Molécule d'oxyde mercurique").

... Voici la molécule d'oxyde mercurique. . . . C'est un composé d'oxyde et de mercure. Qu'est-ce que cette protubérance?

Richard (à mi-voix): Une excroissance.

Le professeur: Linda?

Linda: De l'oxygène.

Le professeur: Eh bien! Qu'est-ce que cette grosse partie alors?

Linda: Du mercure.

Le professeur: D'accord.

(Il écrit "mercure" et "oxygène" au-dessus du dessin).

... Du mercure et de l'oxygène, mais encore? L'oxyde mercurique se compose de mercure et d'oxygène, mais comment se présentent ces éléments, Étienne?

Étienne: De molécules?

Le professeur: Non. Il y a une autre possibilité. . . .

S'ils ne sont pas formés de molécules, de quoi sont-ils formés? Ils sont formés...

Anne: D'atomes.

Le professeur décrit ensuite ce qui se produit, lorsque la substance en question est chauffée. Il n'y a pas eu de débat sur le modèle de molécule.

Il est bon de faire deux observations: Notons d'abord que l'absence de toute argumentation réelle établissant que l'oxyde mercurique est constitué de molécules plutôt que, disons, d'une sorte d'agrégat de particules plus petites. Renée, Georges et Jacqueline, qui fournissent les indications exactes nécessaires, comprennent sans doute que leur participation ne sert qu'à la présentation de la leçon. La réflexion à mi-voix de Richard: "une excroissance", semble juste, et ceci nous amène au second point; rien n'est fait pour établir la validité du modèle de molécule.

On n'en montre pas la plausibilité, en la fondant sur les phénomènes observés. Au contraire, la formule est fournie toute prête par le professeur, de telle façon que les élèves en dépendent sur le plan intellectuel pour la plus grande partie du raisonnement. On voit ici, mieux qu'ailleurs, que l'évaluation d'un raisonnement (grâce à l'esprit criti-

que) ne consiste pas simplement à user de logique ou à résoudre des problèmes! Pour évaluer ce cours de sciences de 9^{e} année, il faut se baser sur une bonne compréhension de la nature de la connaissance et du raisonnement scientifiques. Sous cet angle, nous nous rendons compte que rien ou presque, dans ce cours, ne permet aux jeunes de développer et d'utiliser leur pouvoir de réflexion indépendante. De plus, le vocabulaire utilisé fournit un exemple erroné du mode scientifique de raisonnement.

L'indépendance intellectuelle

Ma collection d'extraits de leçons de sciences contient bien d'autres exemples d'un enseignement favorisant la dépendance intellectuelle des élèves à l'égard de leur professeur. Pour le moment, nous pouvons négliger ces exemples, et en réfléchissant aux extraits ci-dessus, proposer une série d'améliorations pédagogiques pour développer l'indépendance intellectuelle des élèves. Voici les actions qui aident à l'acquisition et à la transmission de la connaissance scientifique:

a) Toute assertion est étayée par des observations.

b) On présente une argumentation.

c) On étaye la relation entre modèle ou formule développée et phénomènes observés par des preuves et une argumentation.

d) On donne les raisons justifiant l'acceptation ou le rejet d'une assertion de l'élève ou de sa réponse.

e) Les propositions, les questions et les avis contraires des élèves sont analysés logiquement.

f) Les élèves se basent sur les observations pour évaluer la validité des modèles, des théories et des explications.

g) On propose des modèles, des théories et des explications supplémentaires aux élèves pour leur permettre de porter un jugement d'ensemble.

h) On cherche l'explication rationnelle des discordances entre observations.

Il faut se rappeler également que la connaissance scientifique est une invention humaine et que, par conséquent les théories, les principes, les explications, les modèles et les postulats le sont également. Les modèles sont régis par des règles dont, entre autres, l'obligation de correspondre aux observations.

L'enseignement et les matériaux didactiques qui se fondent sur ces paramètres contribuent au développement de l'esprit critique et du raisonnement scientifique chez les jeunes.

VII LES POINTS D'ARRIVÉE ET DE DÉPART

Il est possible que mes remarques ne fassent pas l'unanimité. Aussi, à la place d'une récapitulation en style fleuri, je mettrai en relief quelques-uns des points les plus litigieux, afin de lancer le débat, et je proposerai des mesures à prendre pour analyser certaines questions et y avoir recours dans l'enseignement des sciences. (Certains ouvrages utiles sont mentionnés à la fin de mon exposé).

Commençons par l'argumentation elle-même.

1. L'argumentation a débuté par une présentation du développement de la connaissance scientifique:

    a) Dans quelle mesure le savoir de votre discipline s'est-il développé au cours des cinq ou dix dernières années?

2. Nous avons ensuite montré que ce que nous entendons par esprit critique ou raisonnement scientifique consiste fondamentalement dans la résolution de problèmes et l'exercice de la logique:

    a) Pouvez-vous trouver, dans les leçons, les examens oraux, les compositions et les devoirs, des exemples de raisonnement qui n'apparaissent pas comme la résolution de problèmes ou l'exercice de la logique?
    b) Enregistrez une leçon et dactylographiez-en le contenu, puis posez-vous ensuite la question "Quel genre de réflexion semble exiger le professeur?"

3. J'ai évité soigneusement toute allusion à l'aspect psychologique de la réflexion scientifique, parce que la documentation correspondante porte largement sur le mode de raisonnement analysé par les tests psychologiques déjà mentionnés; de plus, les théories du raisonnement ne s'appliquent guère à l'enseignement, parce qu'elles répondent à la question "De quelle façon pensez-vous?", mais n'envisagent nullement la question "De quelle façon devrions-nous penser?" Quelle est votre opinion à ce sujet?

4. J'ai montré que la connaissance scientifique se fonde sur les modèles du monde élaborés par les scientifiques. L'origine humaine des concepts, des théories et des explications le montre à l'évidence:

   a) Quels sont les risques, s'il en est, de ne pas réussir à décrire aux jeunes le contexte de la connaissance scientifique?
   b) En quoi consiste un contexte approprié?
   c) Comment les jeunes conçoivent-ils la nature de la connaissance scientifique? (Voir ci-dessous par quels moyens on peut analyser cette question).

5. J'ai recommandé, en dernier lieu, que l'enseignement des sciences prépare les jeunes à l'indépendance intellectuelle, afin qu'ils puissent évaluer les connaissances scientifiques par eux-mêmes:

   a) L'enseignement prépare-t-il les élèves à réfléchir indépendamment? Les manuels le font-ils? (Voir ci-dessous quelques propositions de réponse à ces questions).
   b) Si l'enseignement ne forme pas les jeunes à l'indépendance intellectuelle, reçoivent-ils une éducation mal orientée? (Cette question exige qu'on définisse ce qu'est l'"éducation").
   c) Pouvons-nous réfléchir indépendamment et devrions-nous le faire? (Cette question incite à chercher ce que signifie vivre en société comme un citoyen responsable et se conformer aux conventions établies).

Quelle est la situation actuelle?

J'ai illustré mon argumentation avec des extraits de leçons de sciences, sans prétendre qu'ils montrent l'état actuel de cet enseignement; le dialogue attire plutôt l'attention sur certaines caractéristiques de l'indépendance intellectuelle et sur le contexte du langage des sciences, tout comme la question: "Qu'est-ce que les élèves en retirent?" Cependant, on ne peut lire ces extraits sans se demander s'ils sont représentatifs et quelles sont les conceptions des élèves au sujet de la nature de la connaissance scientifique. Voici deux façons assez différentes d'aborder cette question et qui vous permettront de connaître la situation actuelle sur ce plan:

1. La première méthode consiste à analyser le déroulement d'une leçon. Demandez à un professeur de sciences de vous laisser enregistrer une leçon (ou enregistrez l'une des vôtres). Dactylographiez-en le

texte ensuite, et déterminez si la leçon favorise la réflexion indépendante, en vous fondant sur les caractéristiques de celle-ci et sur votre connaissance du contexte de la leçon. Ce travail demandera quelque temps et il se peut que vous vouliez le répéter pour d'autres leçons. Si votre intérêt pour l'analyse du processus pédagogique s'éveille ainsi, vous pourrez appliquer la même méthode à quelques chapitres des manuels de sciences de divers niveaux. Nous ne pouvons prédire vos conclusions, mais peut-être serez-vous fort intéressé.

2. La deuxième méthode consiste à se demander comment les élèves des cours de sciences conçoivent le sens de certains termes comme: théorie, modèle, loi scientifique, principe et concept. Il n'est pas aisé d'y parvenir car, si on demande simplement aux élèves de définir le mot "théorie" (par exemple, grâce à un questionnaire), ils donnent une description maladroite de ce qu'ils pensent que leur professeur veut qu'ils sachent à son sujet. Le contexte de leur compréhension est absent. C'est pourquoi il faut procéder de façon pragmatique, et interroger un seul élève, en enregistrant ses réponses au genre de questions suivantes:

   a) Lorsque nous parlons de la loi de l'attraction universelle de Newton, que pensez-vous que signifie le terme "loi"?
   b) Qu'est-ce que c'est qu'une théorie scientifique? Vous pouvez vous servir d'un exemple pour m'expliquer ce que vous entendez par le terme "théorie".
   c) Lorsque nous parlons en physique des "particules fondamentales" (ou de toute autre abstraction qui pourrait véhiculer une information intéressante), que croyez-vous que le physicien veut dire? Les particules existent-elles vraiment ou y a-t-il une autre interprétation possible?

Il faudra multiplier ces questions pour saisir avec précision ce que l'élève comprend. C'est là un long travail, et un seul entretien de, disons, quarante-cinq minutes, pourrait ne servir qu'à mettre en évidence les lacunes de la méthode employée. Il serait utile d'interroger des élèves d'âges divers pour connaître l'évolution de leur compréhension. Lorsque les enregistrements seront rassemblés, il faudra les écouter attentivement: si vous estimez alors que le niveau de compréhension des élèves n'est pas suffisant, ce sera qu'il existe un problème auquel l'enseignement des sciences devra remédier.

Quelles sont les améliorations possibles?

Il y a risque réel que le manque de temps dans un programme d'études déjà surchargé contrecarre l'inclusion de cours sur la nature de la connaissance scientifique. J'aborderai ce problème de deux manières différentes, dont la première est plus radicale que la seconde.

Si l'on reconnaît la validité des principes de la réflexion scientifique tels que je les ai exposés, il faudra inclure des cours sur ce sujet dans le programme d'enseignement des sciences. Comme celui-ci est déjà surchargé, il faudra en éliminer quelques éléments, afin de les remplacer par des cours sur la nature des sciences. Il semble possible d'y procéder sans pertes notables au premier cycle du secondaire et dans la période intermédiaire qui le suit. Ces blocs-matière devront être accessibles à tous les élèves, même s'ils ne se destinent pas à une carrière scientifique. En effet, il serait trop tard de s'en occuper à la fin du second cycle du secondaire. Il est cependant peu probable qu'on introduise des changements aussi radicaux; aussi dois-je proposer une solution de rechange.

Il semble que de légers remaniements aux méthodes pédagogiques actuelles permettraient de développer les capacités de réflexion indépendante des élèves. Les théories sont d'invention humaine et les modèles scientifiques de la réalité ne sont rien de plus que des abstractions; il faut les étayer par des observations et donner une suite rationnelle aux contributions des élèves. Bref, on doit renoncer à la devise "Faites ce que je vous dis et ne faites pas ce que je fais" et prêcher d'exemple.

Cette approche peut s'appliquer aux programmes de toute l'année scolaire, mais les élèves n'en tireront avantage que s'ils connaissent le contexte du langage scientifique. C'est pourquoi il importe de réserver quelque temps, au début d'un cours (peut-être une ou deux séances), pour préciser la nature de la théorie scientifique. On peut y procéder sans perte de temps d'enseignement de la discipline elle-même en mettant

l'accent sur la nature des sciences, dans le cadre du premier bloc-matière d'un cours. (Les ouvrages à consulter concernant ce genre d'approche sont cités dans la bibliographie). De cette façon, nous sommes assurés que l'enseignement convient exactement aux caractéristiques de la réflexion scientifique, les inculque aux élèves et leur permet d'utiliser cet atout important.

Voici quelques questions à prendre en considération lors de l'élaboration d'un nouveau cours ou bloc-matière:

1. Est-il possible d'adapter les premières leçons de plusieurs blocs-matières d'un cours, particulièrement au début de celui-ci, afin de mettre l'accent sur la nature des sciences?

2. Quel genre de programme d'enseignement vous donnerait de bons résultats?

3. (À l'intention de ceux qui désirent effectuer des changements, de la façon indiquée aux alinéas 1 et 2). Lorsque vous vous adressez individuellement aux élèves, décelez-vous en eux une meilleure compréhension de la nature de la connaissance scientifique?

ANNEXE - LISTE D'OUVRAGES À CONSULTER, AVEC REMARQUES

Hugh Munby, "Analyzing Teaching for Intellectual Independence", dans Seeing Curriculum in a New Light: Essays from Science Education, Hugh Munby, Graham Orpwood et Thomas Russell, dir. de publication, Ontario Institute for Studies in Education, Toronto, 1980. Cette brochure est destinée à ceux qui s'intéressent aux divers phénomènes pédagogiques. Le chapitre dont il est fait mention ici traite en détail de la réflexion indépendante et analyse le déroulement des leçons.

Hugh Munby, "Some Implications of Language in Science Education", dans Science Education, vol. 60, n° 1, 1976, pp. 115-124. Notre étude reprend l'analyse de S. Toulmin au sujet de la nature de la connaissance scientifique et l'applique à un certain nombre d'extraits de manuels de sciences. Leur absence d'indications sur le contexte particulier du langage des sciences et ses effets déroutants sur l'élève sont manifestes.

Douglas Roberts, The Mole as an Explanatory Concept: How do you Know a Mole if you see One?, Department of Curriculum, Ontario Institute for Studies in Education, Toronto, 1972. Cette brochure contient un bloc-matière expressément conçu pour expliquer la nature des sciences grâce au concept de la molécule-gramme. Elle contient des textes et l'argumentation correspondante.

Douglas Roberts et Graham Orpwood, Properties of Matter: A Teacher's Guide to Alternative Versions, Ontario Institute for Studies in Educa-

tion, Toronto, 1979. Le point fort de cet ouvrage, tiré du Projet du programme d'études secondaires en sciences au niveau intermédiaire, est qu'il montre comment donner une leçon de trois diverses façons, en insistant sur des aspects différents. Le premier d'entre eux est l'accent donné à la nature des sciences.

Stephen Toulmin, The Philosophy of Science: An Introduction, Harper and Row, New York, 1960. Cet ouvrage, disponible en format de poche, présente un exposé très explicite sur la nature de la connaissance scientifique. Il se fonde sur l'étude de l'optique géométrique et le langage qu'il utilise n'est pas technique. Cet ouvrage constituerait une excellente lecture obligatoire pour les élèves en sciences de fin du secondaire et première année d'université.